



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joonas Latva

METALLIA MATERIAALINA KÄYT- TÄVÄN AM-LAITTEEN HANKINTA

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joonas Latva
Opinnäytetyön nimi	Metallia materiaalinaan käyttävän AM-laitteen hankinta
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	55 + 0 liitettä
Ohjaaja	Osku Hirvonen

Opinnäytetyön aiheena oli selvittää metallia materiaalina käyttävän, AM-laitteenhankintaan liittyviä seikkoja. Opinnäytetyö aiheen toimeksiantaja oli Vaasan ammattikorkeakoulu. Tavoitteena oli löytää VAMK:in käyttöön soveltuva AM-laite, joka täyttää sille asetetut vaatimukset. Hankinta tullaan rahoittamaan VAMK:in, ja mahdollisesti muiden koulutusorganisaatioiden, sekä yhteistyökumppaneiden avulla.

Työssä käydään läpi materiaalia lisäävän valmistuksen laitteisiin liittyviä valmistusprosesseja, laite toimittajia, uusia innovaatioita ja trendejä, sekä taloudellisia yksityiskohtia. Potentiaalisia laitteita vertaillaan laitevertailutaulukon avulla. Laittevertailuun pyrittiin valitsemaan eri tekniikoita edustavia laitteita. Työssä pyritään selventämään ja yhtenäistämään alan käytössä olevaa terminologiaa.

Lopputuloksena työssä valittiin kaksi laitetta, jotka täyttävät annetut vaatimukset, ja soveltuvat käyttökohteeseensa. Opinnäytetyön tulos selkeytti eri laiteominaisuuksien etuja ja haittoja, sekä toi esille alan tulevaisuuden kehityssuuntia. Työn edetessä kävi selväksi, että materiaalia lisäävä valmistus ei ole enää ainoastaan prototyyppien valmistukseen suunnattu teknologia. Tämä teknologia tulee tekniikoiden kehittyessä nousemaan tärkeäksi valmistusmenetelmäksi, perinteisten valmistusmenetelmien rinnalle.

ABSTRACT

Author	Joonas Latva
Title	Purchase of an AM Device
Year	2018
Language	Finnish
Pages	55 + 0 Appendices
Name of Supervisor	Osku Hirvonen

The topic of this thesis was to clarify the purchasing process of an AM-device which uses metal material. This thesis reviews additive manufacturing production processes, advice vendors, new innovations and trends, and financial details related to additive manufacturing. The purpose was to clarify and integrate the terminology that is used in the field.

The topic of thesis was commissioned by VAMK, University of Applied Sciences. The aim was to find a suitable AM-device that meets the requirements set for VAMK. Potential devices were compared using a device comparison chart. The purpose was to use devices with different techniques. The purchase will be funded by VAMK and possibly by other educational organizations and partners.

Two devices were selected that meet the requirements and are suitable for the application. The result of this thesis clarified the pros and cons for the unique features of the devices and introduced the future development. As the work progressed it became clear that additive manufacturing is not only for prototyping anymore. As technology advances, this technology will become an important manufacturing method alongside traditional manufacturing methods.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET

1	JOHDANTO	7
2	MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS	8
2.1	Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät	9
2.2	Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän eri prosessit	9
2.2.1	Jauhepetimenetelmä	10
2.2.2	Materiaalin pursotus	12
2.2.3	Materiaalin ruiskutus	14
2.2.4	Laminointi menetelmä	16
2.2.5	Sidosaineruiskutusmenetelmä	17
2.2.6	Suorakerrostusmenetelmä	19
2.2.7	Nesteen fotopolymerisointi	21
2.2.8	Hybridimenetelmät	23
3	MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN TUOMAT MAHDOLLISUUDET JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	24
3.1	Suunnittelun näkökohtia ja sääntöjä	24
3.2	Käyttö- ja sovelluskohteet	27
3.3	AM tulevaisuus	29
3.4	Standardit	31
3.5	Materiaalit	32
3.6	Käyttökustannukset	35
3.7	Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä tuotettujen kappaleiden rakenteellinen tutkiminen	35
3.7.1	Neutraalikarkaisu	36
3.7.2	Päästö	36
3.7.3	Käytettävät laitteet	37
3.7.4	Laitteiden käyttö osana materiaalia lisäävää valmistusta	37

4	LAITTEISTON HANKINTA	38
4.1	Mallien valinta ja esittely	38
4.1.1	Xact Metal XM300	39
4.1.2	SLM 280 2.0	40
4.1.3	AIM3D ExAM 255	41
4.1.4	3D Systems ProX DMP 300	42
4.1.5	Markforged Metal X	43
4.1.6	Aurora Labs S-Titanium Pro	44
4.1.7	Concept Laser M1 Cusing.....	45
4.2	Laitevertailutaulukko	46
4.3	Laitteen valinta.....	48
4.3.1	Case 1	48
4.3.2	Case 2.....	49
4.3.3	Vertailu.....	49
5	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET.....	52

LYHENTEET

AM	Additive Manufacturing
AM-laite	Materiaalia lisäävän valmistuksen laite
CNC	Computerized Numerical Control
CAM	Computer-aided Manufacturing
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
STL	Tiedosto muoto
Layer	Kerros
PBF	Powder Bed Fusion
ABS	Akryylnitriilibutadieenistyreeni
UV	Ultravioletti
Austeniitti	Eräs raudan allotrooppi
Martensiitti	Tetragoninen hilarakenne

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään materiaalia lisäävän valmistuksen teknologiaa, joka on tällä hetkellä kovassa nousussa. Tekniikoiden kehittyessä ja tätä seuranneesta hintojen laskusta, markkinoille on saatu huokean hintaisia kuluttajatason laitteita, muovin materiaalia lisäävään valmistukseen. Tämä kehitys on tuonut kyseisen valmistusmenetelmän lähemmäksi kuluttajia. Kansankielellä materiaalia lisäävän valmistuksen laitteita kutsutaan usein 3D-tulostimiksi, joka on suurelle yleisölle ehkä se tunnetumpi termi. Tässä opinnäytetyössä käytetään 3D-tulostuksen sijaan standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaista termiä, materiaalia lisäävä valmistus.

Päädyin tähän opinnäytetyöaiheeseen, koska olen kiinnostunut materiaalia lisäävän valmistuksen eri tekniikoista. Kiinnostukseni kyseisiä tekniikoita kohtaan heräsi opintojen aikana, jolloin pääsin hyödyntämään niistä muutamaa Vaasan ammattikorkeakoulun projekteissa. Tässä opinnäytetyössä paneudutaan erityisesti metallin lisäävään valmistukseen, mutta työssä käydään läpi myös muita materiaalia lisäävän valmistuksen prosesseja, jotka soveltuvat mm. muoveille ja keraameille. Työssä tuodaan esille mitä sovelluskohteita kyseisellä valmistusmenetelmällä nykypäivänä on ja mihin suuntaan tekniikoiden uudet innovaatiot ja tulevaisuus ovat tätä valmistusteknologiaa viemässä. Tämä teknologia tarjoaa paljon uusia mahdollisuuksia tulevaisuuden valmistukselle, myös Suomessa. Nyt käydään kilpajuoksua siitä, missä ja miten uutta teknologiaa osataan hyödyntää parhaiten.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Media on kylvänyt otsikoissaan sanaa 3D-tulostus. Varsinkin teollisuustason laitteista puhuttaessa olisi hyvä käyttää 3D-tulostussanan sijaan SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 -standardin mukaista termiä materiaalia lisäävä valmistus. 3D-tulostus on kuitenkin jo niin vakiintunut käsite, että sen kitkeminen kokonaan pois käytöstä on jo lähes mahdotonta. 3D-tulostus termin käyttö on kyllä vähentynyt alan standardisoinnin myötä varsinkin teknisissä julkaisuissa.

Materiaalia lisäävä valmistus on johdettu englannin kielisestä termistä Additive Manufacturing (AM). Se on termi, mikä on saanut alkunsa ASTM International -nimiseltä yhtiöltä, joka standardisoi sen vuonna 2012. Uusien teknologioiden, laitteiden ja materiaalien kehityksen ansiosta tämä tuotantotapa on tuonut aivan uudenlaisia mahdollisuuksia mm. teollisuuden eri aloille. Materiaalia lisäävä valmistustapa on saanut suuren suosion erityisesti terveydenhuollon ja lentokoneteollisuuden parissa. /1/

Kehittynyt 3D-valmistustekniikka, jota myös materiaalia lisäävä valmistus hyödyntää, juontaa juurensa 1980-luvun loppupuolelle. Jonka jälkeen ne ovat portaittain kehittyneet kohti nykypäivän CNC/CAM/CAD/CAE -menetelmiä, joita käytetään yleisesti ainetta vähentävissä menetelmissä esim. jyrsintä. Materiaalia lisäävä valmistus on lisännyt kilpailua materiaalia poistavan ja muovaavan valmistuksen aloilla. Valmistuksessa käytettävä tekniikka määräytyy kappaleen geometrian, materiaalin, hinnan, alan määräysten, tuotantomäärän, sekä pinnanlaadullisten vaatimusten mukaan. Geometrisesti yksinkertainen kappale on vielä tällä hetkellä yleensä halvempi valmistaa esimerkiksi jyrsimällä, tai laserleikkaamalla, kuin materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä. Pienten sarjojen ja monimutkaisten kappaleiden valmistus AM-tekniikoilla on taas ajoittain halvempaa, tai joskus se saattaa olla jopa ainoa vaihtoehto valmistuksen näkökulmasta. /2/

2.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät

Ennen kuin AM -termi standardisoitiin, niin materiaalia lisäävästä valmistuksesta käytettiin englannin kielisiä termejä kuten Rapid Prototyping (RP), Rapid Application (RAD), Rapid Tooling (RT) tai 3D Printing. Kaikille näille termeille on yhteistä tietokonepohjaisen 3D-mallin (CAD) käyttö kappaleen rakenteen määrittämiseksi. CAD-malli ei ole kuitenkaan sellaisenaan käyttökelpoinen materiaalia lisäävässä valmistuksessa, vaan se täytyy muuttaa tuotantolaitteen hallintaohjelmalle sopivaan muotoon, eli STL-tiedostoksi. Tämän jälkeen siivutusvaiheessa hallintaohjelma muuntaa mallin numeeriseksi tiedostoksi (G-code), jonka pohjalta laitteisto valmistaa kappaleen kerros kerrokselta orjallisesti koodin komentojen mukaan. /2/ Monimutkaisissa ja suuremmissa kappaleissa koodin määrä nousee nopeasti tuhansiin riveihin.

Materiaalia lisäävän valmistuksen valmistusprosessi voidaan jakaa karkeasti kahdeksaan eri vaiheeseen. Kaikkia vaiheita ei valmistuksessa välttämättä käydä läpi esim. jälkikäsittely saatetaan valmistusprosessista riippuen jättää tekemättä. Vaiheet ovat: 1. CAD-tiedoston luominen, 2. STL-tiedostoksi konvertointi, 3. STL-tiedoston siirto AM-laitteelle, 4. AM-laitteen asetuksien määrittäminen, 5. Rakennusvaihe, 6. Kappaleen poisto, 7. Jälkikäsittely, 8. Käyttö. /3, s. 44–45/

2.2 Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän eri prosessit

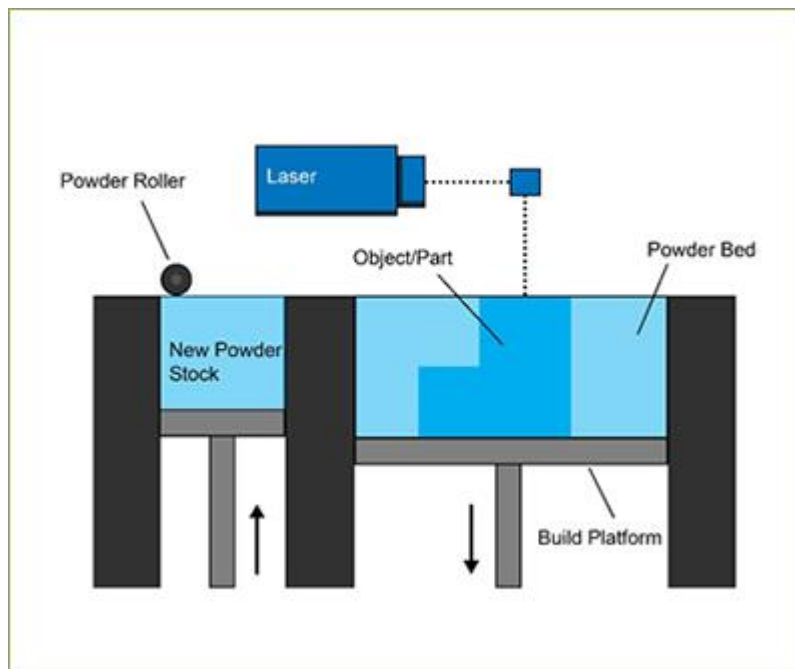
Materiaalia lisäävä valmistus jaetaan usein seitsemään eri luokkaan, näin on menetelty myös materiaalia lisäävän valmistuksen standardissa SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. AM-tekniikoiden kehitys on ollut nopeaa, ja uusia innovaatioita on syntynyt alalle viime aikoina paljon. Tämän johdosta kaikki materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät eivät välttämättä sovi näihin seitsemän luokan raameihin, tai ne saattavat sopia jopa useampaan kuin yhteen niistä. Näissä tapauksissa voidaan käyttää epävirallista termiä hybridimenetelmä. Hybridimenetelmiksi voidaan siis kutsua menetelmää, johon on yhdistetty kaksi tai useampi materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä. Hybridimenetelmäksi voidaan kutsua myös

AM-tekniikoiden menetelmiä, joihin on liitetty jokin perinteinen poistava valmistusmenetelmä, joka kuuluu osana jälkikäsittelyyn. /4/

Seuraavaksi käydään läpi nämä materiaalia lisäävän valmistuksen seitsemän eri menetelmää. Viimeisenä käsitellään myös hybridimenetelmät, joita ei siis olla virallisesti määritelty standardissa SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Hybridimenetelmien käyttö tulee tulevaisuudessa todennäköisesti lisääntymään, kun menetelmiä osataan tulevaisuudessa käyttää ja soveltaa tehokkaammin. Tästä syystä niiden käsittely tässä opinnäytetyössä on oleellista.

2.2.1 Jauhepetimenetelmä

Jauhepetimenetelmä (Powder Bed Fusion) oli ensimmäisiä kaupallistettuja AM-prosesseja. Ensimmäinen jauhepetimenetelmää hyödyntävä tekniikka oli SLS (Selective laser sintering) ja se kehitettiin Texasin yliopistossa Yhdysvalloissa. Kaikkea jauhepetimenetelmä tekniikoita yhdistää, että niissä käytetään yhtä tai useampaa lämmönlähdettä jolla metallijauhetta yhdistetään molekyylitasolla. Yleisimmin käytössä oleva tällainen lämmönlähde on laser, jolloin puhutaan lasersintraus (LS) menetelmään perustuvasta laitteesta. Jauhepetimenetelmässä voidaan käyttää myös ns. sulattavaa tekniikkaa, jolloin lämmönlähteenä käytetään esim. tyhjiössä muodostettavaa elektronisuihkua. Sulattavalla tekniikalla kappaleesta saadaan 100% kiinteä, joka ei pelkällä lasersintrauksella ole mahdollista. /3, s. 107/



Kuva 1. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate.

Monet valmistajat ovat luoneet omia prosessinimikkeitä tekniikoilleen. Näiden tekniikoiden yleisimpiä lyhenteitä ovat Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electro Beam Melting (EBM), Selective Laser Sintering (SLS) ja Selective Heat Sintering (SHS). Prosessinimikkeitä on paljon ja useat niistä ovat käytännössä lähes samanlaisia keskenään. /5/

Perusperiaate tuotantoprosessissa on jauhepetimenetelmissä identtinen ja se etenee seuraavalla tavalla:

1. Kappaleesta mallinnetaan CAD-malli, joka muutetaan STL-tiedostoksi.
2. Kappale asetellaan virtuaalisesti tulostuskammioon ja asetetaan halutut laatu vaatimukset, tuotantolaitteen hallintaohjelmalla.
3. Metallijauhekerros levitetään tulostusalueelle lastalla, tai rullalla.
4. Jauhekerros sintrataan tai sulatetaan valikoivasti lasersäteen avulla.
5. Vaihetta 3 ja 4 toistetaan niin kauan, kunnes kappaleen viimeinenkin kerros on sintrattu, tai sulatettu, jonka jälkeen valmistettu kappale on valmis.
6. Tulostuskammio jäähdytetään, ennen kuin sen lukitus avataan.

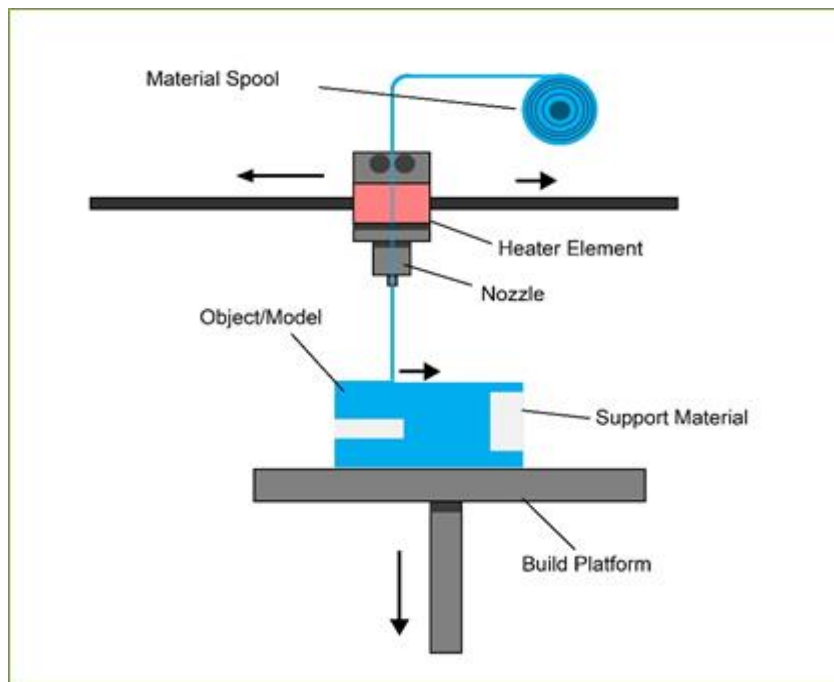
7. Ylimääräinen jauhe imetään, tai sivellään pois. Ylimääräinen jauhe kierrätetään puhdistimen kautta, jonka jälkeen suurin osa siitä käytetään uudelleen.

Kaikkia tekniikoita yhdistää se, että ne toteutetaan suljetussa tulostuskammiossa. Tulostuskammio on suljettu, koska metallien tulostuksessa joudutaan käyttämään suojakaasua. Suojakaasun tehtävä on suojata valmistustapahtumaa ja kaikkea metallijauheen reagointiin liittyvää toimintaa. Suojakaasu vaihtelee riippuen käytetystä tulostusmateriaalista, esim. teräksen kanssa suojakaasuna käytetään yleisimmin typpeä. /6/

Jauhepetimenetelmän etuina verrattuna muihin materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiin, on tulostettavien materiaalien suuri määrä. Näihin materiaaleihin lukeutuu polymeerit, keraamit ja metallit. Jauhe toimii itsessään riittävänä tukimateriaalina tulostettavalle kappaleelle, polymeerejä tulostettaessa. Haittapuolina voidaan pitää mahdolliseen koneistukseen kuluvaan aikaan, joka taas kappaleen geometriasta riippuen voi aiheuttaa myös suuria kustannuksia. Menetelmä saattaa olla kappaleesta riippuen verrattain hidas, sen esilämmityksen ja jäähdätyksen takia. /3, s. 143–144/

2.2.2 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (Material Extrusion) on AM -kategorian seitsemästä menetelmästä se yleisimmin käytössä oleva. Ensimmäisen materiaalin pursotukseen perustuvan tulostusmenetelmän kehitti ja otti käyttöön yhtiö nimeltä Stratasys. Tämä tapahtui jo vuonna 1980. Stratasys kutsuu kehittämäänsä tekniikkaa Fused Deposition Modeling, eli lyhennettynä FDM. /7/ Suureen suosioon, varsinkin kuluttajien keskuudessa on vaikuttanut laitteiden yksinkertainen tekniikka, joka on taas osaltaan mahdollistanut laitteiden huokean hinnoittelun.



Kuva 2. Materiaalin pursotus menetelmän toimintaperiaate.

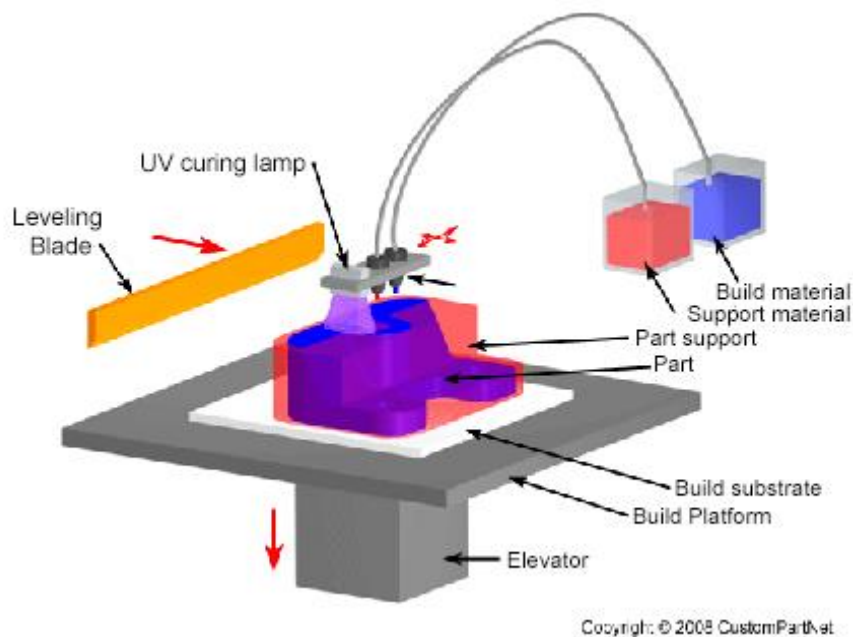
Materiaalia pursottavia menetelmiä kuvaa hyvin, jos kuvittelee tulostimen tulostuspään tilalle kuumaliimapistoolin. Kiinteätä materiaalia syötetään siis kuumentun suuttimen läpi, jonka lämpötila säädetään käytettävän materiaalin mukaan. Tulostettavan materiaalin on oltava osittain kiinteässä muodossa, jotta se tulostuksessaan ja jäähtyessään kiinteytyy oikeaan muotoon, sekä yhtyy kiinteästi alla olevaan kerrokseen. Jos tulostettavan kappaleen geometria on sellainen, että siinä on rakenteita, jotka makaavat ns. tyhjänpäällä, niin tulostukseen joudutaan siinä tapauksessa usein lisäämään tukimateriaalia. Tukimateriaalin määrä ja kiinnityskohdat voidaan lisätä etukäteen CAD-mallia luodessa, tai automaattisesti tulostimen hallintaohjelmalla. Tämä tulostettu tukimateriaali täytyy poistaa tulostuksen jälkeen kappaleesta manuaalisesti. Markkinoilla on myös laitteita, joista löytyy kaksi tulostuspäätä. Tällöin on mahdollista käyttää kahta eri materiaalia samalla laitteella. /8/ Tässä tapauksessa toista suutinta voidaan käyttää tukirakenteiden valmistamiseen, joka antaa mahdollisuuden käyttää vesiliukoisia tukimateriaaleja. Tällaisten tukimateriaalien käyttö saattaa osaltaan vähentää jälkikäsittelyyn käytettävän työn määrää, ja parantaa tuotteen pinnanlaatua.

Tulostusprosessin komennot annetaan G-code komennoilla, joiden avulla x-, y- ja z-akseleita ohjaavia moottoreita ohjataan. Moottorit on sijoitettu mallista riippuen hieman eri tavalla. Kuluttajille suunnatuissa laitteissa yleisin ratkaisu on, että tulostusalusta liikkuu y-suunnassa ja tulostuspäätä liikutetaan x-, sekä z-suunnassa. /8/

Menetelmän etuina on edulliset valmistuskustannukset, sekä kuluttajatason laitteissa huokea hinta. Menetelmällä voidaan käyttää polymeereistä mm. ABS:ää, joka on verrattain monikäyttöistä sen useiden hyvien ominaisuuksien takia. Haittoina ovat menetelmän epätarkkuus ja hitaus verrattuna muihin menetelmiin. Menetelmän ominaisuudet ovat vahvasti sidottuna käytettyyn materiaalin ja suuttimen läpimittaan. /7/

2.2.3 Materiaalin ruiskutus

Materiaalin ruiskutusmenetelmässä (Material Jetting) tulostettavan materiaalin nestemäisessä muodossa olevia pisaroita tiputetaan suuttimen läpi valikoiden. Menetelmässä käytetään yleensä mustesuihku tulostuspäitä, joiden tehtävä on sijoitella materiaali tulostusalustalle, niiden liikkuesssa alustan yli. Kappale rakennetaan kerros kerrokselta, kunnes koko kappale on valmis. /9/



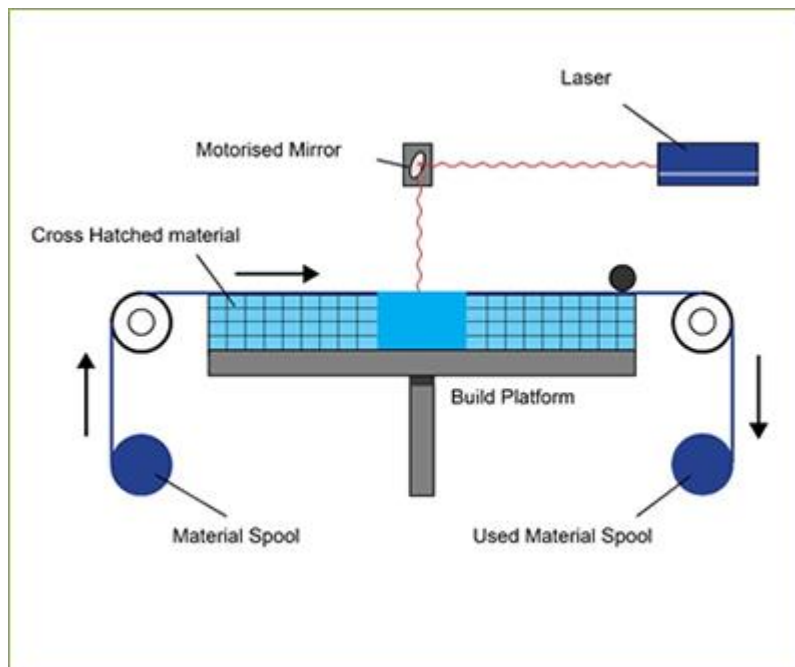
Kuva 3. Materiaalin ruiskutus menetelmän toimintaperiaate.

Materiaalin ruiskutusta hyödyntävistä tekniikoista yleisimmin käytössä oleva tekniikka on, Drop on Demand (DOD). Menetelmässä käytetään yleisesti monisuutin tulostuspäitä, joiden avulla mahdollistetaan usean materiaalin samanaikainen tulostus. Monisuutinjärjestelmällä saadaan nostettua samalla myös tulostus volyy-mia. Menetelmällä käytettävien materiaalien määrää rajoittaa niiden viskositeetti. Materiaali tulee saada todella juoksevaksi, eli sen viskositeetti pitää olla pieni. Menetelmässä käytetty pudotettavan tipan halkaisija saattaa olla muutamia sadas-osa millijä. Näitä tippoja annostellaan tarvittaessa, eikä niitä siis syötetä tasaisella syötöllä. Tämän takia juuri viskositeetti on menetelmässä avain asemassa. Ylei-sesti käytettäviä pienen viskositeetin omaavia materiaaleja ovat mm. vahat ja fo-topolymeerit. Vaikka tulostettavien materiaalien määrää rajoittaa oleellisesti viskositeetti, niin menetelmää on silti mahdollista käyttää yli sadalla eri materiaalilla. Kyseistä ruiskutus tekniikkaa käytetään hyvin yleisesti mm. elintarvikepakkausten päivämäärien merkinnässä. /10/

Menetelmän etuina on järjestelmän korkea tarkkuus, jonka takia materiaalihävikki ja jälkikäsittelyn määrä on saatu minimoitua. Monisuutinjärjestelmä mahdollistaa eri materiaaleista, sekä eri väreistä valmistetun kappaleen valmistuksen saman prosessin aikana yhdellä laitteella. Haittoina ovat materiaalien rajallisuus, esim. metalleja ei voida juurikaan käyttää. Tulostuksessa tarvitaan usein myös tukimateriaalia, joka aiheuttaa lisäkustannuksia ja heikompaa pinnanlaatua. /10/

2.2.4 Laminointi menetelmä

Laminointi menetelmä (Sheet Lamination) perustuu materiaalikalvojen yhdistämiseen. Kalvojen yhdistelmästä muodostuu valmistettavat kappaleet, jotka joudutaan jatko käsittelemään vielä prosessin edetessä. Menetelmällä voidaan laminoida lähes rajattomasti erilaisia materiaaleja, kuten esim. muovia, metalleja ja paperia. /11/



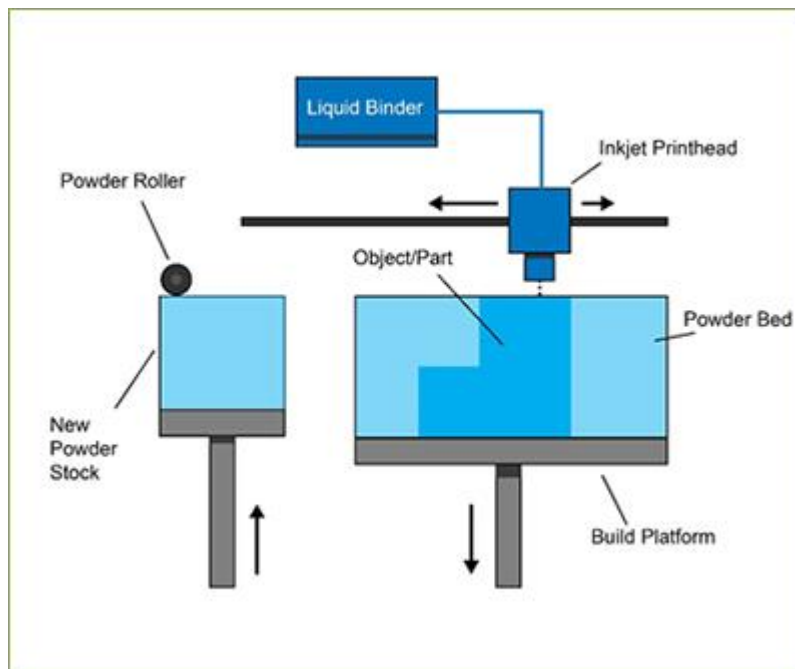
Kuva 4. Laminointimenetelmän toimintaperiaate.

Laminointi voidaan jakaa kahteen pääprosessiin, jotka ovat Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) ja Laminated Object Manufacturing (LOM). UAM-prosessissa käytetään ohuita metallilevyjä tai liuskoja. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja ovat alumiini, teräs, kupari ja titaani. Materiaali liitetään toisiinsa ultraäänen perustuvalla hitsausprosessilla. Prosessi vaatii CNC-työstöä, jonka avulla poistetaan hitsautumaton materiaali. Kappaleen geometriasta riippuen valitaan, että koneistetaanko ylijäävä materiaali jokaisen kerroksen jälkeen, vai käsitelläänkö koko kappale kerralla ohjelman lopussa. Hitsausmenetelmän aikana ei sulateta lainkaan metallia, jonka takia sen energiantarve on vähäisempi, verrattuna perinteiseen hitsaukseen. LOM-prosessi perustuu samanlaiseen menetelmään kuin UAM-prosessi, eli kappale luodaan kerros kerrokselta. Erona on, että LOM-menetelmässä materiaalina käytetään mm. paperia ja sitä ei luonnollisesti hitsata, vaan kalvot liitetään toisiinsa liiman avulla. Etuna UAM-menetelmään nähden on, että LOM-menetelmä ei tarvitse koneistusta, vaan ylimääräinen materiaali voidaan poistaa käsin. /12/

Laminointi menetelmän etuina on edulliset kustannukset, nopeus ja materiaalin käsittely varsinkin LOM-menetelmässä. Haittoihin lukeutuu rajoitettu materiaalien käyttö, sekä jälkikäsittelyn ja materiaalihävikin suuri määrä. UAM-menetelmän hitsausta koskevan tutkimuksen määrä on myös vähäinen, jota voidaan pitää haittana. /12/

2.2.5 Sidosaineruiskutusmenetelmä

Sidosaineruiskutusmenetelmässä (Binder Jetting) käytetään nesteen muodossa olevaa sidosainetta, sekä jauhemuodossa olevaa materiaalia esim. ruostumaton teräs. Sidosainetta ruiskutetaan tulostusalueella olevaan levitettyyn jauhekerrokseen valikoivasti. Menetelmä on kehitetty Yhdysvalloissa MIT:ssä vuonna 1993. Laajimmin menetelmä on levinnyt muottiteollisuuteen, jossa valmistetaan esim. hiekasta tehtyjä muotteja erilaisille metalleille. /13/



Kuva 5. Sidosaineruiskutusmenetelmän toimintaperiaate.

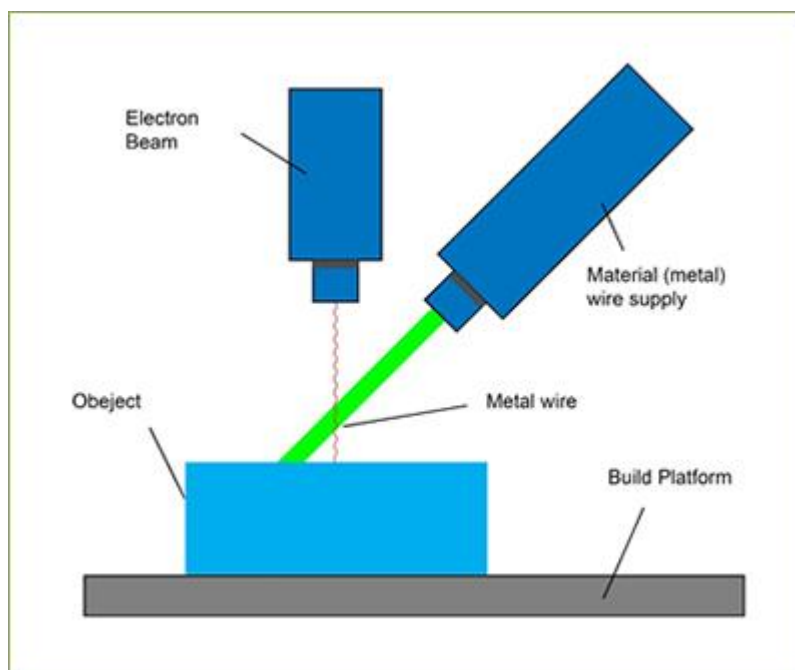
Sidosruiskutusmenetelmässä laite levittää aluksi mekaanisesti esim. lastalla, tasaisen kerroksen jauhetta. Tämän jälkeen jauheen päälle suihkutetaan sidosainetta valikoivasti ensimmäisen läpileikkauksen geometrian mukaan. Useat valmistajat käyttävät uv-kovettuvaa sidosainetta, joka ruiskutuksen jälkeen kovetetaan uv-valoa säteilevällä valonlähteellä, esim. ledillä. Jauheella päällystetty tulostustaso laskeutuu viimeiseksi tarvittavalle tasolle, ja kierto alkaa jälleen alusta. Tätä jatketaan niin kauan, kunnes kappale on valmis. Löytyy myös jauheita, joihin on jo valmiiksi sekoitettu sidosaine. Tässä tapauksessa jauheessa oleva sidosaine aktiivoidaan kappaleen geometria huomioiden valikoivasti, erilaisilla liuottimilla. Joissakin laitteissa sidosaineeseen voidaan sekoittaa väriaineita, joiden avulla kappaleista saadaan eri väreisiä. Yleisimpinä materiaaleina ovat hiekka, muovit, keraamit ja metallit, joista jälkimmäisen kanssa joudutaan käyttämään useimmiten suoja-kaasua. /13/

Menetelmän etuina on materiaalien suuri määrä. Prosessi on vertailuissa yleensä nopeampi, kuin muut AM-teknologiaan perustuvat. Sideaineen eri tyypeillä voi-

daan muokata kappaleen ominaisuuksia. Kappaleita voidaan valmistaa myös eri väreillä. Haittoina voidaan pitää mahdollista jälkikäsittelyä, joina ovat sidosaineen kovetus, kappaleen jäädyttäminen ja sintraus. Menetelmässä käytetyn sideaineen takia joitakin rakenteellisia osia ei voida valmistaa. /14/

2.2.6 Suorakerrostusmenetelmä

Suorakerrostusmenetelmässä (Direct Energy Deposition) käytetään kohdistettua lämpöenergiaa materiaalin yhdistämiseen. Lisättävää materiaalia sulatetaan ja si-
joitetaan samanaikaisesti. Kohdistettavan lämpöenergian lähteenä käytetään laseria, plasmakaarta tai elektronisädettä. Menetelmän toimintaperiaate muistuttaa perinteistä hitsaamista. /15/



Kuva 6. Suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaate.

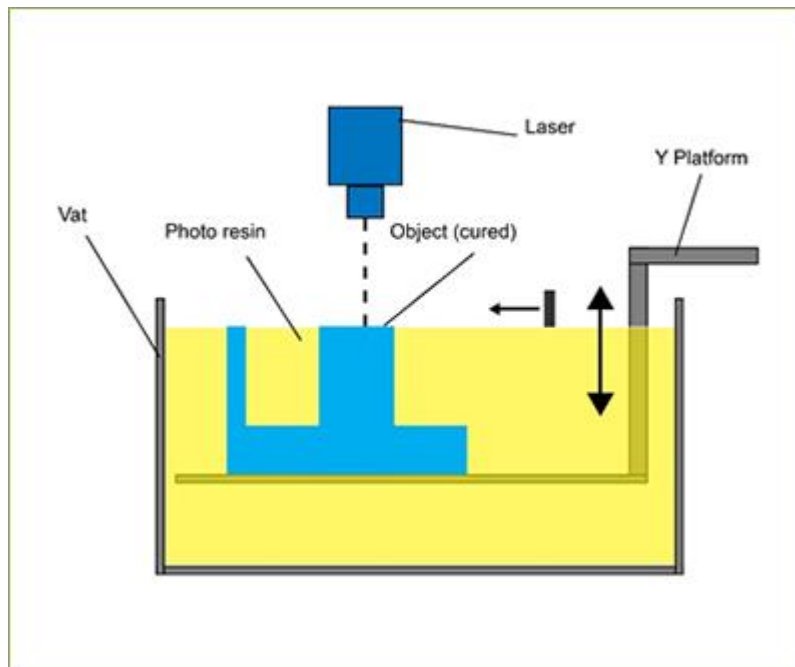
Suorakerrostusmenetelmässä voidaan käyttää monipuolisesti eri olomuodoissa olevia materiaaleja. Materiaalia voidaan syöttää laitteesta riippuen langan, tai jauheen muodossa. Yleisin kombinaatio sulatustapojen ja materiaalien välillä on laser yhdistettynä jauheeseen. Tällöin menetelmä on hyvin samankaltainen, kuin jauhepetimenetelmä. DED-menetelmällä voidaankin valmistaa periaatteessa samanlaisia mikrorakenteita samalla tarkkuudella, kuin mitä jauhepetimenetelmällä. DED-menetelmän ominaisuuksista tukimateriaalin puute rajoittaa suunnittelua tietyissä tilanteissa. DED-menetelmällä ei voida siis rakentaa tyhjänpäällä makaavia rakenteita, toisin kuin esim. jauhepetimenetelmän useimmilla materiaaleilla, jossa itse jauhe toimii tukimateriaalina. /15/

DED-menetelmän laitteissa, jotka käyttävät valmistus materiaalina jauhetta, joudutaan jauheen sijoitteluun käyttämään kaasua. Kaasun käyttö jauhemateriaalien kanssa, ei kuitenkaan automaattisesti edellytä suljettua tulostuskammiota. Kaasun käytöllä mahdollistetaan jauheen käyttö myös kalteville pinnoille. Teoriassa suorakerrostusmenetelmällä on mahdollista käyttää sekoitettuja jauhelaatuja, jolloin kiinteän kappaleen kulutukselle altistuvat pinnat voidaan tulostaa kulutusta kestävämmällä materiaalilla. Eri materiaaleista sekoitetun kappaleen rakenteelliset ominaisuudet kuitenkin heikentyvät tällöin. Suurin etu jauhepetimenetelmään verrattaessa on DED-menetelmän suurempi tulostusalue. Tämä siksi, että DED-menetelmässä materiaalia sijoitetaan ja sulatetaan vain sinne missä sitä tarvitaan, eikä sitä levitetä koko tulostusalueelle. Laitteisto voidaan periaatteessa yhdistää esim. tavalliseen teollisuusrobottiin, joka avaa myös mahdollisuuksia varsinkin toiminta-alueen suhteen. DED-prosessia hyödyntäviä eri yritysten lanseeraamia tekniikoita ovat mm. LENS ja LMD. Molemmat kyseisistä tekniikoista pohjautuvat jauhemateriaalin sulatukseen laserin avulla. /15/

Menetelmän etuina on sen muunneltavuus varauksilla. Yleisesti verrattuna tulostusala on melko suuri. Haittoina on materiaalien rajoittunut käyttö. Menetelmässä saatetaan joutua käyttämään erillistä jälkikäsittelyä. Haittoihin voidaan lukea myös se, että fuusiojauheiden tutkimusta tulee edistää, jotta niitä pystyttäisiin hyödyntämään tehokkaammin materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmillä. /16/

2.2.7 Nesteen fotopolymerisointi

Nesteen fotopolymerisointi (VAT Photopolymerisation) on muista poikkeava materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikka, sillä siinä käytetään lisättävänä materiaalina nestettä. Tämä neste on fotopolymeeriä ja se kovetetaan valikoivasti uv-valonlähdettä käyttäen. Kun kerros on kovetettu uv-valolla, alusta liikkuu alas-, tai ylöspäin riippuen mallista, jonka jälkeen kovetetaan seuraava kerros. Kappale valmistetaan näin kerros kerrokselta. Menetelmällä voidaan valmistaa todella yksityiskohtaisia kappaleita. /17/



Kuva 7. Nesteen fotopolymerisointi menetelmän toimintaperiaate.

Stereolitografia (SLA tai SL) on teknologia, joka hyödyntää edellä käsiteltyä menetelmää. Stereolitografia järjestelmissä, joissa käytetään kerroksittain laskevaa tulostusalustaa, kerros kovetetaan ja nesteenpinta tasoitetaan lastalla. Tulostusmateriaalina käytettävää fotopolymeeriä kovetetaan uv-laserin avulla. Nousevan tulostustason järjestelmissä kappale tulostetaan käytännössä väärinpäin. Tällöin tu-

lostusalusta lasketaan ensin nestesäiliön pohjan tuntumaan. Fotopolymeeri kovetetaan lasersäteellä, jota lähetetään nestealtaan pohjan läpi. Kun kerros on kovetettu, niin tulostusalustaa nostetaan seuraavan kerroksen tasolle ja kovetus aloitetaan jälleen. /18/

SLA-tekniikka on yleisin tekniikka nesteen fotopolymeerisoinnissa, mutta valmistajat ovat kehitelleet myös muita fotopolymeerisointiin perustuvia tekniikoita. Yksi tunnetuimmista näistä tekniikoista on CLIP (Continuous Liquid Interface Production technology), joka on yhtiön Carbon3d kehittänyt. CLIP muistuttaa jonkin verran SLA-tekniikkaa, mutta ne eroavat toisistaan muutamilta osin hyvin selvästi. CLIP-prosessin suurin ero kaikkiin muihin materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikoihin on se, että kappaletta ei muodosteta kerros kerrokselta portaittain, vaan tulostusalustaa nostetaan koko ajan tasaisella nopeudella. Tämä tekniikkaa vaatii prosessorilta huomattavasti enemmän laskentatehoa, sillä z-koordinaatit muuttuvat tällöin jatkuvasti, toisin kuin muissa tekniikoissa, joissa kappale rakennetaan kerros kerrokselta. CLIP-prosessissa kappaletta kovetetaan uv-valon avulla jatkuvasti, toisin kuin SLA-prosessissa, jossa se esim. kerrosta vaihdattaessa sammutetaan. Prosessin suurin etu SLA-prosessiin verrattuna on sen nopeus. Nopeus on 25-100 kertaa nopeampi, kuin mihin nykyiset SLA-laitteet pystyvät. CLIP-prosessi tuottaa myös rakenteellisesti parempia ja käytökseltään vakaampia kappaleita, sillä polymeerin kovettaminen on jatkuvaa, jolloin materiaali kovettuu tasaisemmin. CLIP-prosessin kerroskorkeutta säätämällä pienemmäksi voidaan päästä tulokseen, jolloin kerrostuneisuutta ei pysty enää ihmissilmin havaita. /17/

Nesteen fotopolymeerisointi menetelmän etuihin kuuluu sen korkea tarkkuus. Rakennusala on myös verrattuna muihin menetelmiin suuri. Prosessi on nopea, etenkin CLIP-prosessissa. Haittoihin kuuluu jälkikäsittely, sillä kappaleet tulee pestä huolellisesti esim. isopropanolilla ja vedellä tulostuksen jälkeen. Kappaleisiin tarvitsee myös lisätä usein tukirakenteita, jotta ne olisivat riittävän vahvoja. Eri materiaalien käyttö on menetelmällä hyvin rajoittunutta, esim. metalleja ei voida tulostaa lainkaan. /18/

2.2.8 Hybridimenetelmät

Hybridimenetelmiksi kutsutaan menetelmiä, joissa on yhdistelty kahta, tai useampaa materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmää, tai AM-laitetta johon on yhdistetty jokin jälkikäsittelylaitteisto. Hybridimenetelmäksi voidaan siis kutsua jo järjestelmää, jossa käytetään esim. jauhepetimenetelmää ja jälkikäsittelynä viimeistellessä CNC-koneistuskeskusta. Tällainen AM-menetelmän, sekä CNC-koneistuksen yhdistäminen onkin yleisimmin käytössä oleva hybridimenetelmä.

/19/

Hybridimenetelmät voivat siis sisältää koneistusta, pinta-, sekä muita jälkikäsittelyprosesseja. Vertaillessa hybridi- ja tiettyä am-menetelmää keskenään, on muistettava ottaa prosessin läpivientiajassa huomioon jälkikäsittelyyn kuluva aika. Jälkikäsittelyyn saattaa kappaleen geometriasta riippuen kulua jopa enemmän aikaa, kuin itse materiaalia lisäävään valmistukseen. Kaikkea jälkikäsittelyä ei voida kuitenkaan välttämättä suorittaa jälkikäteen, vaan esim. kappaleen sisäiset ontelot joudutaan käsittelemään prosessin edetessä. Vaikka kappaletta voidaan koneistaa prosessin edetessä, ei kaikkea haluamaansa jälkikäsittelyä voi välttämättä saada, esim. kappaleen ulkoisen geometrian sisälle jääviä kaikkia rakenteita ei pystytä koneistamaan. Tarkoitus hybridimenetelmissä on yhdistellä eri menetelmien ominaisuuksia, löytäen omiin käyttötarpeisiin sopivimman järjestelmän. Ominaisuuksia joihin usein pyritään hybridimenetelmissä ovat mm. parempi pinnan laatu, nopeampi läpimenoaika, materiaali hävikin ja käyttökustannuksien minimointi. /19/

Menetelmän edut riippuvat pitkälti käyttökohteesta ja mitä menetelmiä on fuusioitu. Järjestelmästä tulee joka tapauksessa aina monikäyttöisempi ja se voidaan myös suunnitella pitkälle automatisoiduksi kokonaisuudeksi. Huonoina puolina on järjestelmän tekniikan lisääntyessä ylöspäin kipuava hinta. /19/

3 MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN TUOMAT MAHDOLLISUUDET JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Materiaalia lisäävä valmistus on melko tuore valmistusmenetelmä, jos verrataan perinteisempiin menetelmiin, eli poistavaan- ja muovaavaan valmistukseen. AM-prosessi on siis itsessään vielä niin uusi, että sen tekniikan ja prosessien kehitys on ollut hyvin nopeaa. Media on myös osoittanut kiinnostuksensa alaa kohtaan ja AM-tekniikasta voidaan lukea päivittäin useita uutisia kansainvälisellä tasolla. Kehityksen huima vauhti on herättänyt ihmisissä myös pelonsekaisia tunteita.

3.1 Suunnittelun näkökohtia ja sääntöjä

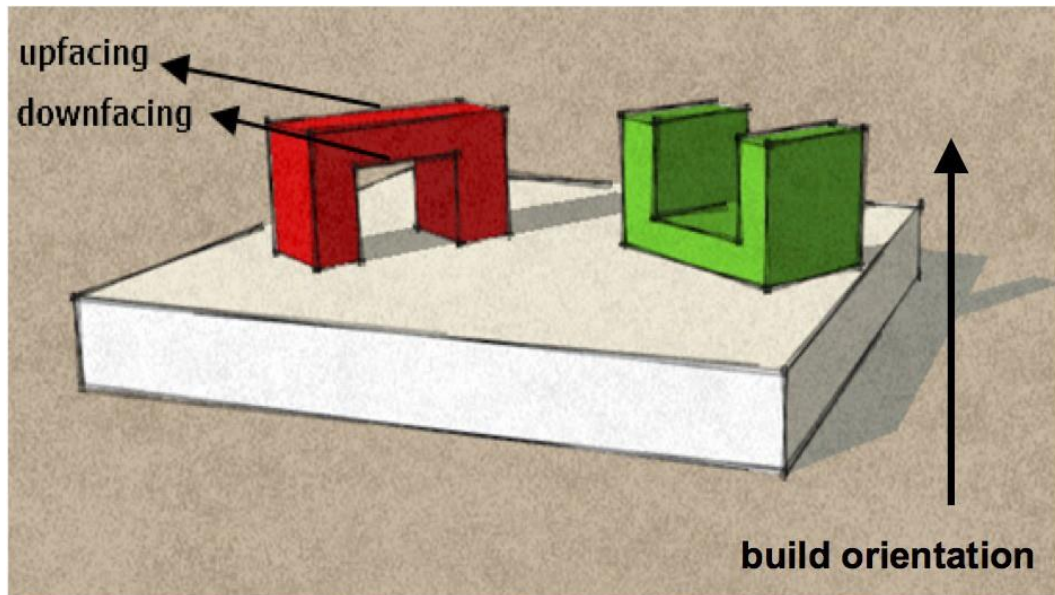
DFM (Design for Manufacturing) on malli, jonka mukaan kappale tulee suunnitella niin, että se on geometrialtaan mahdollisimman helppo valmistaa. DFM-ajattelutapaan liittyy myös vahvasti kokoonpanoissa käytettävien komponenttien määrän minimointi. AM-tekniikoiden valmistustapa antaa aiheita miettiä tätä ajattelutapaa nyt uudelleen. Menetelmän uniikit ominaisuudet tuovat mahdollisuuksia erityisesti valmistetun kappaleen monikäyttöisyyteen ja kustomointiin. Nämä ominaisuudet antavat valmistajalle mahdollisuuksia alentaa valmistuskustannuksia huomattavasti, erityisesti pienissä ja kustomoiduissa tuotantoerissä. Monimutkaiset muodot, jotka olivat ennen jopa mahdottomia valmistaa ovat nyt kyseisen prosessin ansiosta mahdollisia. Hyvänä esimerkkinä tästä on onttojen rakenteiden valmistus, joka on ollut ennen todella kallista, tai mahdotonta. /3, s. 399–400/

Layereihin, eli kerroksiin perustuva valmistustapa, jota AM edustaa, tuo siis uusia mahdollisuuksia. Jos kappale on sellainen, että se on jo aiemmin valmistettu jollain muulla valmistusmenetelmällä, niin paras lähestymistapa ei välttämättä ole keskittyä pelkästään ongelmakohdan ratkaisuun esim. kiinnike. Paras lähestymistapa saattaa usein olla, että kappaleen suunnittelu aloitetaan ”puhtaalta pöydältä”, jotta materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmästä saadaan otettua kaikki hyöty irti. Usein kappaleissa on ongelmakohdan lisäksi myös muita rakenteita, joita voidaan optimoida käytettävissä olevien AM-tekniikoiden avulla. Näin saadaan val-

mistettua käyttökohteeseen optimoidumpi kappale, koska valmistuksellisia rajoitteita on huomattavasti vähemmän. Menetelmän vakiinnuttua teollisuuden laajempaan käyttöön, pakottaa se suunnitteluhenkilöstön muuttamaan lähestymistapaansa valmistuksen rajoitteita ja mahdollisuuksia ajatellen.

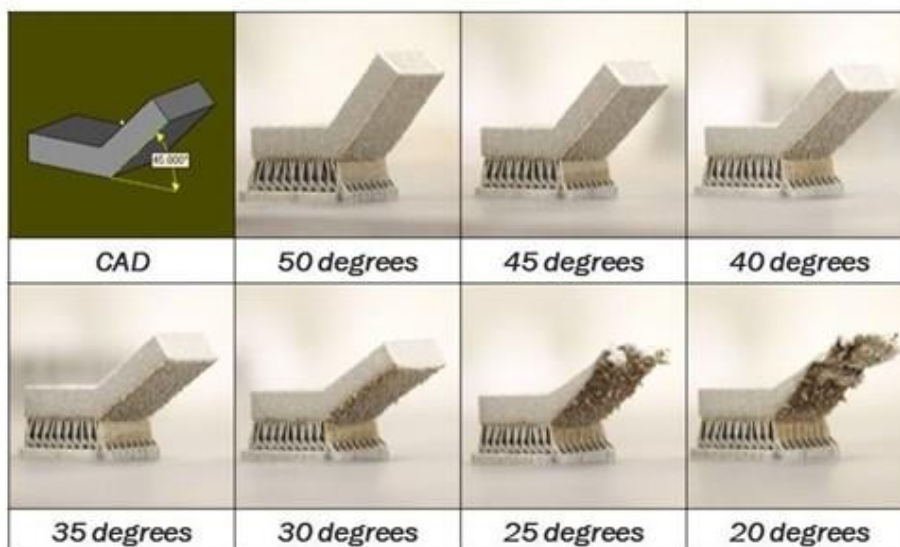
Osien suunnittelussa tulee huomioida muutamia sääntöjä, joita noudattamalla päästään parempaan lopputulokseen. Ensinnäkin, jos suunnittelijoiden ammattitaito materiaalia lisäävän valmistuksen suhteen on matala, niin hyvin todennäköisesti aiheeseen perehtyneen konsultin palkkaus tulee halvemmaksi, kuin kalliilla laitteilla tehtävät virheet. Konsultilta voi saada myös paljon aikaa ja rahaa säästäviä neuvoja suunnitteluun. /20/

Omalta osaltaan yksi merkittävimmistä asioista valmistuksen ja erityisesti laadun kannalta on kappaleen orientaatio, eli missä asennossa kappale valmistetaan. Orientaatio on asia, jolla voidaan vaikuttaa merkittävästi kappaleen valmistusajan ja materiaali-, sekä muihin valmistuskustannuksiin. Valmistuksessa tulisi välttää negatiivisia, eli alaspäin roikkuvia pintoja. Nämä ovat siis pintoja, joiden pinnan tasot osoittavat alaspäin, kun huomioidaan rakennus suunta, joka on useimmiten ylöspäin. Alaspäin suunnatuilla pinnoilla pinnan laatu on toleranssien suhteen usein huonompi, verrattuna ylöspäin suunnattuihin. Kuvassa 8 on demonstroitu, kuinka kappaleen alaspäin suunnattuja pintoja voidaan välttää, eli punaisen kappaleen valmistuksessa joutuisi käyttämään tukimateriaalia valmistuksen apuna. Valmistusajan ja laadun kannalta optimaalisin vaihtoehto on, jos tukimateriaalin käyttö voidaan välttää kokonaan. Sillä tukimateriaalin poistamisesta jää pintaan aina jälkiä, joka on ei toivottu ominaisuus pinnanlaadun suhteen.



Kuva 8. Kappaleen orientaatio.

Tyhjän päällä, ilman tukimateriaalia makaavat rakenteet saattavat aiheuttaa valmistuksessa ongelmia. Hyvänä yleissääntönä voidaan pitää, että horisontaalisesti katsottuna alle 45 asteen kulmia tulisi välttää, jotta päästään pinnanlaadullisesti ja rakenteellisesti hyvään lopputulokseen. Kuvassa 9 on tutkittu rakenteen kulman muutoksen vaikutusta lopputulokseen SLS-tekniikalla.



Kuva 9. Rakenteiden kulmien vaikutus pinnanlaatuun.

Laitteisto asettaa myös kappaleille tiettyjä yleisiä rajoituksia. Valmistajat ilmoittavat laitteiden tiedoissa suurimman mahdollisen kappaleen valmistus mitat, eli tulostusalan. Näitä mittoja suurempaa kappaletta ei voida valmistaa kyseisellä laitteella, yhdessä osassa. Tiedoissa mainitaan myös pienin kerrospaksuus, joka laitteella voidaan saavuttaa. Tätä ominaisuutta kutsutaan myös z-tason resoluutioksi. Laitteen resoluutiota pienempiä yksityiskohtia ei voida siis luonnollisesti valmistaa. Jauhepetimenetelmän laitteissa on todella tarkka laser ohjausjärjestelmä, jolla päästään jopa muutaman tuhannesosa millin tarkkuuteen x- ja y-tasolla. Z-akselin suuntaiset yksityiskohdat ovat alaspäin suuntautuneiden lämpöparametreista johtuen epätarkempia. Metallista valmistettavissa kappaleissa tulee huomioida kappaleen lämpötilamuutokset esim. kappaleen äärimitoissa. Metallisissa kappaleissa lämmön aiheuttamat jännitykset voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa kappaleisiin halkeamia. Halkeamia ja muita lämmönmuutoksista aiheutuvia vaurioita voidaan vähentää lisäämällä teräviin kulmiin pyöristyksiä tai viisteitä, jolloin kappaleesta tulee orgaanisemman muotoinen. /20/

3.2 Käyttö- ja sovelluskohteet

Materiaalia lisäävä valmistus hakee sijaansa Suomen teollisuuden parissa ja osa yrityksistä hyödyntää sitä jo muussakin, kuin prototyyppien valmistuksessa. Prototyyppien valmistuksessa menetelmän edut tulevat yrityksille konkreettisesti esille, kuten esimerkiksi muunneltavuus. Suomen lähtökohdat menetelmän hyödyntämiselle ovat todella hyvät, sillä Suomesta löytyy paljon huippuosaamista tekniseltä alalta.

Suomessa käynnistyi vuonna 2016 projekti nimeltään DIVA (digitaaliset varaosat). Projektiin osallistui 13 yritystä Suomesta, joiden joukossa on Suomen teollisuuden suurimpia yrityksiä. 1,4 miljoonan euron hanke rahoitettiin yhdessä Tekesin (60%) ja osallistuneiden yritysten kesken. Hankkeen päämääränä oli luoda työkalut, jolla voidaan siirtyä varaosien valmistus- ja varastointiketjusta digitalisoitumisen kautta dynaamiseen verkostomalliin. Tällöin varaosien tietoja ja 3D-malleja siirretään ja säilytetään digitaalisesti, jolloin kappaleita voidaan valmistaa

lähempänä loppukäyttäjää ja pääomaa vapautuu varastointikuluista muuhun käyttöön. /21/

Eniten materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntävä teollisuuden ala on lentokone-teollisuus, jossa sitä on hyödynnetty teknologian alkua ajoilta asti. Yksi syy tekniikan yleistymiselle lentokoneteollisuudessa on, että kappaleilta vaaditaan äärimmäisen paljon ominaisuuksia. Näitä vaativiin toimintaympäristöihin luotuja kappaleita on usein tehokkainta valmistaa juuri materiaalia lisäävällä valmistus tekniikalla. Ominaisuuksia, joita lentokoneteollisuudessa kappaleilta usein vaaditaan ovat korkea lujuus-paino suhde ja lämpötilamuutoksien sietokyky. Kaikki Yhdysvaltojen ja Euroopan suurimmat lentoteollisuuden valmistajat käyttävät AM-tekniikoita tuotannossaan. Maailman suurimpiin lentokoneteollisuuden valmistajiin kuuluva Boeing otti käyttöön ensimmäisen muoville suunnatun jauhepetimenetelmä laitteiston jo vuonna 2002. Lentokoneteollisuuden toimijat kehittelevät myös aktiivisesti erilaisia pääosin metallisia materiaaleja, jotka vastaavat vielä paremmin heidän tiukkoja vaatimuksiaan. Toinen tunnettu lentoteollisuuden valmistaja nimeltä Airbus on kehittänyt toisen sukupolven alumiini-magnesium-skandium seoksen, joka on nimetty ScalmetalloyRP:ksi. Tällä seoksella on raportoitu olevan kaksi kertaa paremmat mekaaniset ominaisuudet, kuin yleisimmillä alumiini seoksilla. /3, s. 468–472/

Toinen ala, joka on hyödyntänyt materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikkaa lähes teknologian julkaisun alku ajoilta asti, on terveydenhuolto, joka käyttää tekniikkaa laaja-alaisesti hyväkseen. Proteesien ja implanttien AM-tekniikoiden menetelmillä on yleistynyt valtavasti. Nämä kappaleet ovat usein kustomoituja, jonka takia niiden valmistus materiaalia lisäävällä menetelmällä on nykyisen tekniikan avulla nopeaa ja vaivatonta verrattuna muihin menetelmiin. Hyvä esimerkki kustomoiduista kappaleista löytyy hammashuollosta, jossa AM-laitteita käytetään hammasimplanttien valmistuksessa. Terveydenhuolto kehittelee myös omia materiaalejaan AM-laitteille. Lentokoneteollisuuteen verraten lääketieteessä keskitytään suurimmaksi osaksi eri muovilaatuihin. /3, s. 455–468/

Autoteollisuus on myöskin hyödyntänyt materiaalia lisäävää valmistusta, tämän teknologian alku taipaleelta asti. Kaikesta materiaalia lisäävään valmistukseen käytetystä rahasta n. 17% käytetäänkin juuri autoteollisuudessa, eli se on yksi suurimmista investoijista alalla. Autoteollisuudessa tuotantomäärät ovat yleensä suuria esim. 100 000 kpl per vuosi, jolloin materiaalia lisäävä valmistus on todettu kalliiksi menetelmäksi valmistaa osia massatuotanto malleihin. Autoteollisuudessa AM-laitteita hyödynnetään paljon mm. prototyyppien valmistuksessa, tuotannon tehostamisessa ja korkeamman hintaluokan mallien komponenteissa. Kilpa-autoilussa Formula F1 on ollut materiaalia lisäävän valmistuksen suurin käyttäjä ja menetelmää on hyödynnetty F1-autoissa jo kuluvaan vuosituhannen alkuvuosilta asti. Formula-autoissa on pitkälti paljon samoja vaatimuksia osilta, kuin lentokoneiteollisuudella, eli korkea lujuus-paino suhde ja aerodynaamisuus. /3, s. 472–473/

Suomessa tekniikan hyödyntäminen ei ole lähtenyt yhtä nopeaan nousuun, kuin vaikka Saksassa. Vuonna 2016 Suomessa oli n. 10 teolliseen materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntävää yritystä, joita lukeutuivat mm. Wärtsilä ja Kone. Nämä yritykset hyödyntävät kyseistä tekniikkaa tuotekehityksessä, mutta myös enenevissä määrin tuotannossa. Terveystieteiden käytössä materiaalia lisäävällä valmistus menetelmällä valmistetut kappaleet ovat kuitenkin jo hyvin tavanomaisia, tekniikan kustomointikyvykkyyden ansiosta. /22/ Vuonna 2017 Suomesta löytyi myös kaksi kotimaista 3D-tulostin valmistajaa Minifactory ja Prenta. /23/

3.3 AM tulevaisuus

Digitaalisen skannauksen kehittyessä, uskotaan pienten tuotantomäärien tuotteiden hinnan tippuvan, kun suunnitteluprosessista saadaan nopeampi ja kustannustehokkaampi. Tuotteista voidaan tehdä kehittyvän tekniikan avulla geometrialtaan monimutkaisempia, jotta ne soveltuvat paremmin käyttötarkoituksiinsa. Eikä niitä tarvitse enää valmistaa perinteisillä menetelmillä, jolloin monimutkaiset kappaleet joudutaan usein kustannussyistä valmistamaan useammasta osasta. Myös valmistusyksiköiden koot pienenevät ja pienten AM prosessia hyödyntävien yksiköiden

määrä tulee lisääntymään. Laitteiden tekniikkaa jatkaa kehitystään ja suurten tehdaskokoisten laitteiden rakennusala tulee kasvamaan ja toisaalta myös laitteiden tarkkuus kasvaa, jolloin voidaan valmistaa mikrorakenteita. Ajan saatossa myös laitteiden hinnat tulevat laskemaan ja laitteista kehitellään käytännöllisempiä. /3, s. 475–477/

Alalla on paljon yrityksiä, jotka tarjoavat palveluitaan esim. suunnittelua, valmistusta yms. Yksi tällainen yritys on saksalainen Materialise. Yritys valmisti vuonna 2016 yli miljoona komponenttia laitteillaan ja näistä vajaa 1% oli metalli kappaleita. Kuitenkin tällä hetkellä metallisten komponenttien valmistus materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä on kovassa kasvussa maailmalla. Yksi syy tähän on ilmailuteollisuus, joka on paininut uuden valmistusmenetelmän hyväksymismenettelyiden kanssa, ja on nyt saanut luotua valmiit menettelyt testattaville osille. Ilmailuteollisuuden vahvasta vaikutuksesta, topologian optimointiin panostetaan myös useilla muilla valmistajilla. Sillä keveys on varsinkin ilmailuteollisuudessa yksi merkittävimmistä ominaisuuksista, komponenteilla. /24/

Tulevaisuudessa alalla tullaan näkemään paljon kehitystä prosessin automatisoinnin saralla. Valmistajat pyrkivät kehittämään ratkaisuja materiaalia lisäävän valmistuksen automatisointiin, mutta myös osien mahdollisen jälkikäsittelyn automatisointiin. Jälkikäsittelyyn kuuluu laitteistosta riippuen eri toimintoja, mutta yleisimmät ovat irrotus tulostusalustasta, koneistus ja lämpökäsittely. Tällä hetkellä valmistajilta löytyy valmiita ratkaisuja materiaalin käsittelyn minimointiin, mutta jälkikäsittelyyn ei valmiita ratkaisuita vielä löydy. /24/

Materiaalia lisäävä valmistus on tuonut paljon uutta tekniikkaa, jonka avulla on voitu ratkaista ongelmia ja alentaa valmistuskustannuksia. Tämä valmistustapa tuo myös tietynlaisia uhkia. Ilmeisin uhka minkä AM-laitteet ovat välillisesti tuoneet, ovat aseet. Valmistustapa on antanut mahdollisuuden valmistaa laittomia ja toimivia tuliaseita. Internetistä voidaan ladata valmis STL-tiedosto, joka syötetään 3D-tulostimelle ja muutamassa tunnissa komponentit ovat valmiita. Solid Concepts on valmistanut jo viisi vuotta sitten, metallisen pistoolin materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä. Vaikka vielä tänä päivänä kuluttajahintaisilla lait-

teilla voidaan tulostaa ainoastaan muoveja, niin kehitys kehittyy. Metallia materiaalinaan käyttävät AM-laitteet ovat käytössä vielä nykyään, vain lähinnä teollisuudessa. Laitteiden hinnat tulevat kuitenkin koko ajan alas päin, kun niiden käyttö yleistyy ja niissä käytettävä tekniikka kehittyy. /25/



Kuva 10. Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettu metallinen pistooli.

3.4 Standardit

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 on materiaalia lisäävän valmistuksen standardi, joka on päivitetty versio vuoden 2016 vastaavasta standardista ja näin ollen korvaa sen. Standardin päämääränä on määrittää materiaalia lisäävän valmistuksen keskeisimmät termit ja nimikkeet. Yhteisten termien ja nimikkeiden käyttö on edellytys alan toimijoiden keskinäisen kommunikoinnin kannalta. /26, s. 5/

ISO/ASTM 52901:2017 -standardissa keskitytään yleisesti materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen kappaleiden vaatimuksiin. Standardissa käydään myös läpi valmistusmenetelmän perus terminologiaa. /27/ Standardi on siis hyvä materiaalista riippumaton yleis-standardi, niin kuin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017.

ISO/ASTM PRF 52910 keskittyy materiaalia lisäävään valmistukseen suunnittelun näkökulmasta. Teos on standardin ensipainos ja on kirjoitushetkellä vielä kehitysvaiheessa. Kyseisessä standardissa tulee olemaan ohjeita materiaalia lisäävän valmistuksen suunnitteluun ja keskeisiä harjoituksia. Standardi on yleismalli, jonka ohjeet soveltuvat käytettäväksi kaikilla AM-laitteilla. Teoksessa ei siis käsitellä kuinka eri tekniikat, tai materiaalit vaikuttavat suunnitteluun. Teos soveltuu erityisen hyvin oppilaille, jotka opiskelevat mekaniikkasuunnittelua, tai tietokoneavusteista suunnittelua. /28/

Materiaalia lisäävän valmistuksen alalla on pari uutta standardia kehityksen alla, jotka ovat suunnattu juuri metalleille. Ensimmäinen näistä on ISO/ASTM DIS 52911-1. Tämä standardi tulee sisältämään ohjeita suunnitteluun, ja se on suunnattu nimenomaan jauhepetimenetelmille. /29/ Toinen metallien lisäävään valmistukseen liittyvä standardi on ISO/ASTM CD 52907. Tämä standardi tulee sisältämään teknistä tietoa metallijauheista. /30/

3.5 Materiaalit

AM-laitteet ja niiden tulostustarkkuudet ovat parantuneet isoin harppauksin lisääntyneen laskentatehon ja muun tekniikan kehityksen ansiosta. Laitteiden kehityksessä monet valmistajat kehittelevät uusia materiaaleja, jotka soveltuvat paremmin käyttökohteisiinsa. Aiemmin ja edelleen AM-laitteet käyttävät paljon jo valmiiksi kehiteltyjä materiaaleja kuten esim. ABS-muovi. Nämä materiaalit ovat käyttökelpoisia, mutta niitä ei ole todellakaan optimoitu uniikin valmistusmetodin omaavien AM-laitteiden käyttöön. /3, s. 27–28/

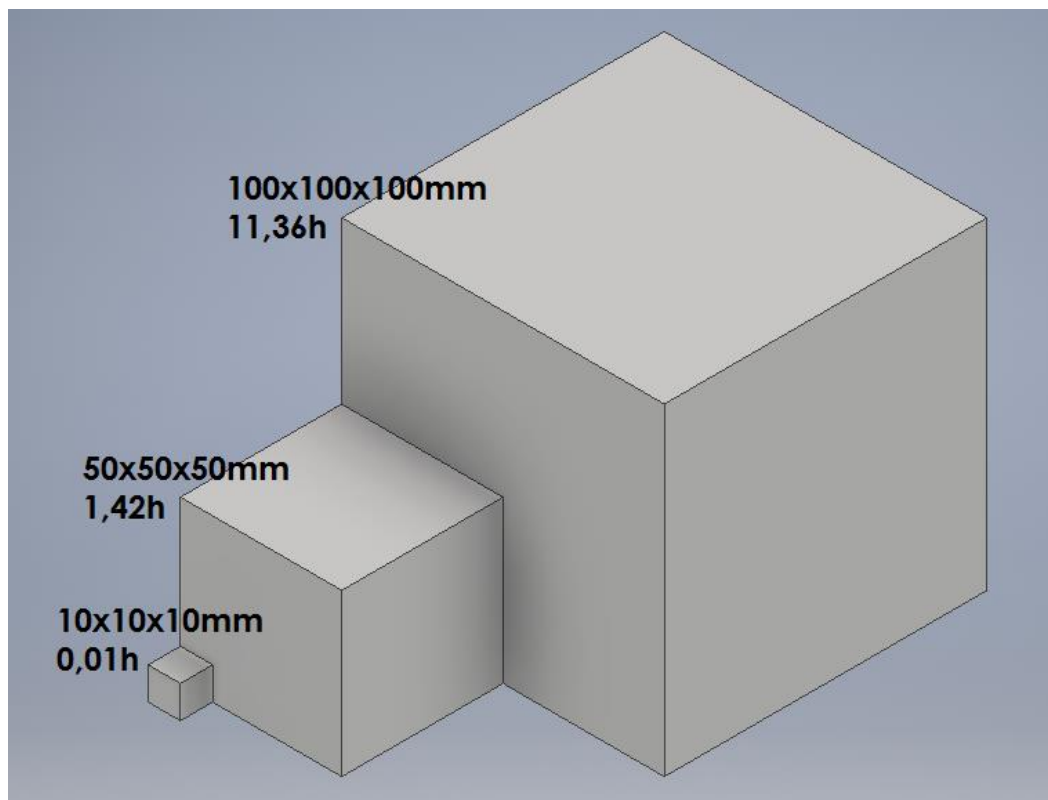
Materiaalien kehitys näkyy mm. laserin käyttöön perustuvien jauhepetimenetelmien jauheen laadussa. Jauhe meni vanhemman sukupolven laitteissa nopeasti käyttökelvottomaan kuntoon, mutta tekniikan ymmärryksen lisääntyessä materiaaleja saatiin kehitettyä AM-prosesseihin paremmin soveltuviksi. Tällaisten materiaalikehityksien myötä valmistettujen kappaleiden laatu on parantunut ja läpimeinoaika on nopeutunut. /3, s. 27–28/

Taulukko 1. Materiaalien hinnat.

Materiaali	Hinta
PLA 1.75mm	23€/kg
ABS 1.75mm	25€/kg
Nylon 1.75mm	38€/kg
Fotopolymeeri UV-neste	142€/l
Ruostumaton teräs jauhe 316L	68€/kg
Alumiinijauhe 7075	89€/kg
Titaanijauhe Ti64	390€/kg

Taulukon hinnat on kerätty www.ebay.com- ja www.alibaba.com-verkkosivustoilta. Jokaisen materiaalin hinta on keskihinta vähintään kolmen eri valmistajan tuotteesta, ja hinnat on pyöristetty euron tarkkuuteen. Varsinkin jauhepetimenetelmässä käytettävien metallijauheiden hinnat olivat ”kiven alla”, sillä suurimmat laitevalmistajat eivät ilmoita materiaalihintoja julkisesti verkkosivullaan. Eivätkä he luovuta niistä tietoja yksityishenkilöille. Suurimpien valmistajien merkin alle brändätyt materiaalit maksavat todennäköisesti jonkin verran enemmän, kuin mitä taulukon keskihinnat antavat ymmärtää.

Kerätyn tiedon perusteella voidaan todeta, että metallijauheiden hinnat ovat materiaalista riippuen jopa kymmenkertaiset raakahintoihin verrattessa. Jauhemateriaalin vaatimukset selittävät osittain hintoja. Esimerkiksi titaanijauheen Ti64 yleinen raekoko on 45–105µm, jolloin jauhe täytyy olla tasalaatuista ja todella hienojakoista. Edellä mainittu metallijauheiden hinta on varmasti yksi syy, joka jarruttaa materiaalia lisäävän valmistuksen yleistymistä teollisuudessa. Jauhemateriaalien kilohinnoista voidaan suoraan päätellä, että suuret tuotantomäärät tulevat kalliiksi materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmillä. Edellyttäen kuitenkin, että kappaleen geometria on sellainen, että se ylipäättään voidaan valmistaa poistavan tekniikan menetelmällä, joka ei välttämättä ole itsestäänselvyys esim. ontoissa kappaleissa. Poistavaa tekniikkaa hyödynnetään laajasti esim. CNC-koneissa.



Kuva 11. Kappaleen valmistusajat.

Kuvaan on merkitty kappaleiden teoreettiset valmistusajat jauhepetimenetelmällä. Rakennusnopeusarvona on käytetty SLM 280 2.0, 400W twin laser -järjestelmän 88cm³/h. Valmistusajat ovat pyöristetty kahden desimaalin tarkkuuteen. Ajoista voidaan todeta, että suuren volyymin sarjatuotantoon menetelmä soveltuu valmista-aikojen puolesta vielä heikosti. Useimmat alemman hintaluokan laitteet on varustettu yhdellä noin saman tehoisella laserilla, jolloin rakennusaika kasvaa edellä luetelluista lähes kaksinkertaiseksi. Valmistusajoissa ei ole otettu huomioon mahdollista esilämmitys- ja jälkijäähdytys aikaa.

3.6 Käyttökustannukset

Metallia materiaalina käyttävän AM-laitteen käyttökustannuksiin vaikuttaa moni asia. Laitteen valmistus prosessi määrittelee, mitä materiaalia, tai materiaaleja laitteella on mahdollista käyttää. Onko prosessi valmistajan patentoima, ja onko siinä mahdollista käyttää vain saman valmistajan rakennusmateriaalia. Materiaalia lisäävän valmistuksen materiaalihintoja on lueteltu taulukossa 1. Käyttökustannuksiin vaikuttaa myös se, käytetäänkö prosessissa erillistä tukimateriaalia, vai muodostetaanko tukirakenteet itse rakennusmateriaalista. Mahdollinen jälkikäsittely nostaa käyttökustannuksia, eli jos tukimateriaali joudutaan koneistamaan kappaleesta, tai pestä tukimateriaali liuottavalla pesuaineella rakenteista pois. Tulostuskammioissa käytetään jauhepetimenetelmässä aina suojakaasua, joka nostaa osaltaan myös käyttökustannuksia. Yleisimmät käytössä olevat suojakaasut AM-laitteissa ovat argon ja typpi, joiden saatavuus on hyvä Suomessa. Myös sähkönkulutus ja laitteiston huolto- ja korjauskulut vaikuttavat syntyneisiin kokonaiskäyttökustannuksiin.

3.7 Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä tuotettujen kappaleiden rakenteellinen tutkiminen

Vaasan Technobothniassa on materiaalilaboratorio, josta löytyy laitteita materiaalien lämpökäsittelyyn ja kokeelliseen testaukseen. Tästä syystä tässä opinnäyte-

työssä oli syytä pohtia, kappaleille suoritettavien eri lämpökäsittelyjen mahdollisuuksista. Seuraavaksi käsitellään aiheeseen liittyen kaksi keskeisintä lämpökäsittelymenetelmää, mitä laitteita materiaalilaboratoriosta löytyy, ja kuinka niitä voidaan hyödyntää osana materiaalia lisäävää valmistusta.

3.7.1 Neutraalikarkaisu

Neutraalikarkaisu, joka on toiselta nimeltään martensiittikarkaisu, on teräkselle suoritettavista karkaisuista yleisin. Teräksen rakenteesta tulee karkaisussa erittäin kova, mutta se aiheuttaa myös sen, että samaan aikaan rakenteesta tulee hauraampi. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa kappale kuumennetaan vaiheittain teräseoksesta riippuen n.800–1220°C. Teräksen mikrorakenne muuttuu austeniitiksi 730–900°C, riippuen teräseoksesta. Prosessin toisessa vaiheessa ylläpidetään lämpötiloja, jolloin lämpötilaerot tasaantuvat ja mikrorakenne saavuttaa austeniittisen tilan. Viimeisessä vaiheessa kappale sammutetaan väliaineessa, joka useimmiten on karkaisualtaassa oleva vesi, vesisuolaseos tai öljy. Riippuen teräksen seoksesta ja kappaleen geometriasta, sammutuksessa voidaan käyttää myös mahdollisesti paineistettua tyyppiä. Sammutuksen täytyy olla riittävän nopea, jotta kappale ei ehdi palautua alkuperäiseen muotoonsa. /31/

3.7.2 Päästö

Päästö on menetelmä, jossa kappale kuumennetaan teräseoksesta riippuen päästöuunissa 160–500°C tai yli. Lämpötilaa pidetään vakiona tietyn aikaa, jonka jälkeen lämpötilaa aletaan laskemaan kontrolloidusti. Päästöuunissa voidaan tarvittaessa käyttää suojakaasua, jolla suojataan kappaleen pintaa hapettumiselta. Päästöllä saadaan muokattua teräksen mikrorakennetta niin, että siitä tulee sitkeämpi, mutta samalla kappaleen kovuus arvo laskee. Menetelmä suoritetaan usein esim. neutraalikarkaisun jälkeen, koska karkaistu kappale on hauras, jolloin päästöllä voidaan muokata teräksen kovuus- ja sitkeyssuhdetta. /32/

3.7.3 Käytettävät laitteet

Materiaalilaboratoriosta löytyy Naberthermin valmistama N41-mallinen teollisuuskäyttöön tarkoitettu lämpökäsittelyuuni. Kyseisessä mallissa on erillinen ohjausyksikkö, jolla voidaan säätää uunin lämpötilaa ja luoda erilaisia lämmitysohjelmia eri metalleille. Laboratoriosta löytyy myös metallien karkaisuun käytettävä allas. Allas on Snuustalin valmistama ja tässä mallissa allas on jaettu kahteen osaan, jossa on öljylle ja vedelle omat altaat.

3.7.4 Laitteiden käyttö osana materiaalia lisäävää valmistusta

Materiaalia lisäävällä valmistustavalla valmistettujen metallisten kappaleiden kokeelliseen testaamiseen löytyy monia laitteita technobothnian materiaalilaboratoriosta. Valmistetun kappaleen jatkokäsittelyssä olisi mahdollista hyödyntää mm. Naberthermin lämpökäsittelyuunia, ja Snuustalin karkaisuallasta. Näiden laitteiden avulla on mahdollista toteuttaa neutraalikarkaisu ja päästö. Näin voidaan tutkia AM-laitteilla tuotettujen kappaleiden ominaisuuksia, sekä kuinka kappale käyttäytyy esim. vetokokeessa, jos sille tehdään esim. neutraalikarkaisu. Vetokokeessa on myös mahdollisuus verrata AM-laitteella tuotettuja kappaleita, laserleikattuihin, tai koneistettuihin kappaleisiin.

4 LAITTEISTON HANKINTA

Laitteiston hankintaan liittyy aina jotain käyttäjän ja hankkijan asettamia vaatimuksia. Hankinnassa tuleekin ottaa huomioon monia eri seikkoja. Esimerkiksi jo pelkästään laitteiston fyysinen koko voi pois sulkea vaihtoehtoja. Mitään kaikenkattavaa hankkimistaulukkoa ei voida tehdä, sillä jokaisessa käyttökohteessa on omat vaatimuksensa laitteelle. Yleisiä rajoittavia tekijöitä on mm. hankintahinta, käytettävät materiaalit, tarkkuus, valmistus nopeus, rakennusala, fyysinen koko, paino, käyttöjännite, automatisoinnin mahdollisuuden puute ja käyttökustannukset.

Koulun puolesta laitteistolle asetettiin kaksi hankintaan liittyvää vaatimusta. Ensimmäinen oli, että laitteiston rakennusala tulee olla minimissään 200x200x300 mm. Toisena vaatimuksena oli, että laitteistolla pitää voida valmistaa kappaleita yleisimmistä materiaaleista, tai ainakin vähintään ruostumattomasta teräksestä ja alumiinista.

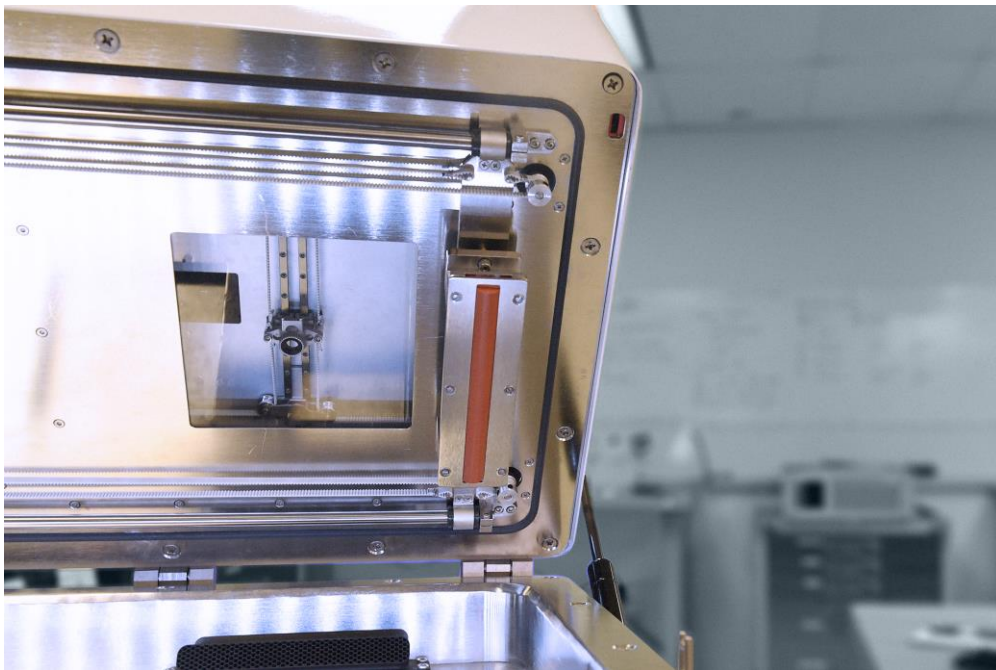
4.1 Mallien valinta ja esittely

Vertailuun valittiin seitsemän mallia eri valmistajilta. Mallit pyrittiin valikoimaan siten, että mahdollisimman monet eri valmistustekniikat, sekä hintaluokat tulisivat edustetuksi. Näin nähdään, onko eri hintaisissa laitteissa ”paperilla” kuinka paljon eroa. Vertailuun otettiin mukaan myös eri tyyppisiä valmistajia, vanhoja, sekä uusia, jopa alle vuoden vanha startup-yritys.

4.1.1 Xact Metal XM300

Xact Metal on todella nuori yritys ja se on perustettu start-up rahoituksella vuonna 2017 Yhdysvalloissa. Yrityksellä on vasta kaksi AM-laite mallia, jotka käyttävät materiaalina metalleja. Molemmat malleista XM200 ja XM300 tulevat myyntiin vuoden 2018 aikana. /33/

Malli XM300 on kehityksen alla ja käytettävien materiaalien suhteen tekniset tiedot vielä elävät. Mallin toimitukset alkavat vuoden 2018 syksyllä. Laitteen hinta on 400 000–600 000 \$, riippuen valituista optioista. Hintaa on saatu alas patentoidun Xact Core™ systeemin ansiosta. Patenti koskee uutta teknologiaa, jossa pieniä, kevyitä ja nopeita peilejä liikutetaan X- ja Y-suunnassa. Peilejä hyödynnetään lasersäteen kohdistamisessa. Tämä tekniikka korvaa yleisemmän galvanometri peileillä ja linsseillä toteutetun lasersäteen kohdistuksen. /34/



Kuva 12. XM 300 Xact Core.

4.1.2 SLM 280 2.0

SLM Solutions Group AG on metalliin pohjautuvan materiaalia lisäävän valmistuksen teknologiatuotannon markkinajohtaja. SLM on yksi alalla pisimpään toimineista yrityksistä ja heidän tuotteitaan käytetäänkin useilla eri aloilla, mm. ilmailu-, sekä autoteollisuudessa ja osana terveydenhuoltoa. SLM Solutions oli ensimmäinen yritys, joka onnistui käyttämään materiaalina alumiinia prosessissaan. SLM Solutionsin materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet hyödyntävät yleisimmin metallin materiaalia lisäävässä valmistuksessa käytössä olevaa SLM-prosessia. Yritys keskittyy toiminnassaan pääasiassa SLM-prosessiin ja sillä saralla laitteiden ja integroitujen järjestelmäratkaisujen kehittämiseen, myyntiin, sekä laitteiden kokoamiseen. /35/

Malli SLM 280 2.0 voidaan tilata monella eri lasertekniikalla, asiakkaan vaatimuksien mukaan. Laserjärjestelmää muuntelemalla voidaan komponenttien järjestelystä riippuen saavuttaa jopa 80% korkeampi rakennusnopeus. Malliin on saatavilla myös laaja valikoima muita optioita mm. jauheensäilytykseen ja syöttöön, sekä korkeamman lämpötilan rakennusaluusta. Laitteen ohjain ohjelmisto hyödyntää avointa lähdekoodia, joka tuo käyttäjälle mahdollisuuksia asettaa räätälöityjä parametreja.



Kuva 13. SLM 280 2.0.

4.1.3 AIM3D ExAM 255

AIM3D GmbH on Saksassa vuonna 2017 perustettu yritys. Yritys on julistanut tavoitteekseen tuoda materiaalikustannuksia alas, erityisesti metallisten kappaleiden. Perustajat kertovat sivuillaan, että metallia materiaalina käyttävää AM-laitetta ei yleensä käytetä tuotannossa materiaalien korkean hinnan takia, joka korreloi suoraan kappaleen korkeita valmistuskustannuksia. AIMD3D on suunnitellut laitteen, jolla voidaan valmistaa monenlaisia eri materiaaleja yhdellä ja samalla laitteella, ja on näin myös kustannustehokkaampi, kuin kilpailijoiden metalliin perustuvat materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet. /36/

Malli ExAM 255 on siitä erikoinen, että se käyttää materiaalina samoja pellettejä mitä yleensä on totuttu käyttämään ruiskuvalaessa. Menetelmä antaa mahdollisuuden käyttää todella laajaa valikoimaa eri materiaaleja mm. terästä ja muoveja. ExAM 255 on myös ensimmäinen AM-laite, joka käyttää CEM-prosessia metallin materiaalia lisäävässä valmistuksessa.



Kuva 14. ExAM 255.

4.1.4 3D Systems ProX DMP 300

3D Systems on alansa pioneeri, sillä vuonna 1983 yksi yrityksen perustajista, nimeltä Chuck Hull valmisti ensimmäisen AM-laitteella luodun osan koko maailmassa. Osa luotiin Chuckin vuonna 1984 patentoimalla stereolitografialaitteistolla. Vuonna 1986 Chuck perusti 3D Systems -yrityksen, ja se oli maailman ensimmäinen ja nykyään vanhin 3D-tulostusyhtiö. Yritys on tuonut ensimmäisen 3D-tulostimensa markkinoille jo vuonna 1987. 3D Systems on kehittänyt innovaatioita alalle jo yli kolmekymmentä vuotta. /37/

Malli ProX DMP 300 hyödyntää 3D Systemsin patentoitua levitysmenetelmää. 3D Systemsin mukaan tämä mahdollistaa pienempien hiukkasten käytön, joka mahdollistaa ohuempien seinämäpaksuuksien valmistuksen. 3D Systemsin tekniikalla päästään jopa 5 Ra -pinnanlaatuun, joka vähentää jälkikäsittelyn määrää. Käytettävän tekniikan ansiosta laitteella voidaan valmistaa horisontaalisesti katsottuna, jopa 20-asteen kulmaan taivuttavia rakenteita ilman lisätukia. Tämä parantaa osaltaan myös pinnanlaatua, vähentää jälkikäsittelyn määrää ja pienentää materiaalikustannuksia. /38/



Kuva 15. ProX DMP 300.

4.1.5 Markforged Metal X

Markforged on perustettu vuonna 2013. Yritys julkaisi vuonna 2014 maailman ensimmäisen hiilikuitua materiaalinaan käyttävän AM-laitteen, jonka malli nimike on Mark One. Yrityksellä on laitteita niin metallien, kuin muovienkin materiaalia lisäävään valmistukseen. Mallistosta löytyy laitteita, jotka on suunnattu myös teollisuuskäyttöön. Yritys on saanut strategiakumppaneikseen suuria globaaleita yrityksiä kuten mm. Microsoft Ventures, Siemens Next47 ja Porsche SE. Markforged on myös ollut aktiivisesti mukana kehittämässä uusia paremmin materiaalia lisäävään valmistukseen soveltuvia materiaaleja. /39/

Malli Metal X julkaistiin vuonna 2017. Malli perustuu heidän neljännen sukupolven komposiittia materiaalinaan käyttävän laitteen tekniikkaan. Uutta tekniikkaa kutsutaan nimellä ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Uudessa tekniikassa materiaalina käytetään lankamuodossa olevaa metallijauhetta, jossa on muovista sidosainetta. Materiaali suihkutetaan kerros kerrokselta menetelmällä, ja lopuksi kappale sintrataan erillisessä lämpökäsittelyuunissa. Sintrauksessa materiaalissa oleva sideaine poltetaan, ja lopputuloksena on kiinteä metallikappale, jolla voidaan saavuttaa jopa 99,7% kiinteä lopputuote. /40/



Kuva 16. Metal X.

4.1.6 Aurora Labs S-Titanium Pro

Aurora Labs on yritys, joka on erikoistunut nimenomaan metallia materiaalinaan käyttäviin AM-laitteisiin. Aurora Labsin valikoimaan kuuluu materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet, sen osat ja jauhemateriaalit. Yrityksellä on ainoastaan yksi tulostinmalli, mutta he ovat kehittelemässä suuremman kokoluokan laitetta nimenomaan kustannustehokkaaseen teollisuuskäyttöön. /41/

Malli S-Titanium Pro pystyy hyödyntämään kolmea eri prosessia DMLS-, DMLM- ja DED-prosessia. Tekniikka moniprosessivalmistukseen on suojattu patentilla. Laitteella voidaan tulostaa myös materiaaleja hyvin laajalla skaalalla. Ohjelmistossa hyödynnetään avointa lähdekoodia, jolloin toimintoja ja parametreja voidaan muokata käyttöön sopiviksi. S-Titanium Pro on kehitetty erityisesti tutkimus, kehitys ja koulutuskäyttöön. /42/



Kuva 17. S-Titanium Pro.

4.1.7 Concept Laser M1 Cusing

Concept Laser GmbH on vuonna 2000 perustettu yritys. Yritys tarjoaa kone- ja laitosteknologia ratkaisuita materiaalia lisäävään valmistukseen. Nykyään Concept Laser on osa General Electric (GE) yritystä, joka kuuluu maailman johtaviin digitaalisiin teollisuusyrityksiin. Yrityksellä on asiakkaita monilla eri toimialoilla mm. ilmailuteollisuudessa, lääketieteessä ja muottivalmistuksessa. Vuonna 2016 yhtiö sai materiaalia lisäävän valmistuksen alan, vuoden pioneeri palkinnon, ja yhtiöllä on myös paljon palkinnon saaneita innovaatioita. /43/

Malli M1 Cusing sopii pienten ja keskisuurien komponenttien valmistukseen. Laite hyödyntää prosessissaan DMLM-prosessia. Mallin prosessia ja laitteistoa kehitetään erittäin tarkaksi, jonka johdosta se soveltuu erinomaisesti mm. hammashuoltoon, tai muottiteollisuuteen. Mallin käyttöön ottoa luonnehditaan yksinkertaiseksi ja nopeaksi. Laite voidaan ostaa yksittäin, tai jälkikäsittelylaitteiston kanssa. /44/



Kuva 18. M1 Cusing.

4.2 Laitevertailutaulukko

Laitevertailutaulukko on laadittu pääasiassa valmistajien kotisivuilla ilmoitettujen teknisten tietojen perusteella. Taulukon sarakkeen merkintä * = ei tiedossa. Taulukon 2 materiaalisarakkeet teräs, alumiini ja titaani tarkoittavat, pystyykö laite käyttämään rakennusmateriaalina kyseistä materiaalia. Materiaalisarakkeet eivät ota huomioon materiaalien eri seoksia. Kyllä merkintään riittää, että laite pystyy hyödyntämään vähintään yhtä kyseisen materiaalin seosta.

(Taulukko 2. Laitevertailu).

Malli	XM 300	SLM 280 2.0	ExAM 255	ProX DMP 300	Metal X	S-Tita-nium Pro	M1 Cusing
Proses-si	PBF	SLM	CEM	DMP	ADAM	SLS, SLM, DMD	DMLM
Fyysi-set mi-tat (m)	1,118x0,712x1,398	2,600x1,200x2,700	*	2,40x2,20x2,40	0,575x0,467x1,120	0,6x0,7x2,350	2,323x1,507x2,308
Paino (kg)	*	n. 1300-1800	*	5000	68	n.200	n.1500
Raken-nusala (mm)	254x330x330	280x280x365	255x255x255	250x250x330	250x220x200	200x200x500	250x250x250
XY tark-kuus (µm)	< 20	*	50	20	*	70	*
Z tark-kuus (µm)	*	20	5	20	50	30	20
Suoja-kaasu	*	Argon	*	Argon tai typpi	*	Argon	Typpi
Mate-riaali teräs	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Mate-riaali alumi-ni	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	*
Mate-riaali titaani	Kyllä	Kyllä	Kyllä	*	Kyllä	Kyllä	*
Käyttö-jännite (V)	220	400	*	400	220	415	400
Hinta (\$)	400 000-600 000	*	50 000-100 000	*	99 500	49 999	*

4.3 Laitteen valinta

Vertailussa oli mukana seitsemän mallia eri valmistajilta, ja eri hintaluokista. Laitteen valintaan ohjaa aina sille asetetut vaatimukset. VAMK:in puolelta tulleet vaatimukset laitteelle olivat 200x200x300 mm rakennusala, ja materiaaleista vähintään teräksen, sekä alumiinin käyttömahdollisuus. Laitteiston valintaa hankaloitti budjetin epävarmuus, eli lukkoon lyötyä budjettia hankinnalle ei vielä ole.

4.3.1 Case 1

Kuvitellaan tilanne, että budjetti on n.150 000 €. Annetaan tilanteelle tunniste case 1. Tällöin oma valintani laitteistoksi olisi Markforgedin Metal X, joka maksaa 99 500 \$. Valintani perustuu monen eri vaikuttajan summaan. Metal X-malli on tuore ja sen toimitukset ovat alkaneet vuoden 2017 syyskuussa. Laitteen valmistusprosessin jälkikäsittelyyn kuuluu materiaalissa olevan sidosaineen poisto lämmittämällä. Tähän valmistaja tarjoaa saman merkin alla olevaa sintraukseen suunniteltua laitetta Sinter-1. Laitteen hinta on 14 990 \$. Kappaleen jälkikäsittelyyn kuuluu myös kappaleen puhdistus pesemällä. Tähän tarkoitukseen valmistajalta löytyy myös laite, Wash-1. Laitteen hinta on 9 990 \$. Laitteiston kokonaishinnaksi lisälaitteineen jää alle 125 000€. Tämä on varsin kilpailukykyinen hinta, jos verrataan kilpailijoiden saman rakennusalan omaavia malleja Metal X:än.

Metal X:n ADAM-prosessin luonne antaa mahdollisuuden luoda onttoja kappaleita, joita jauhepetimenetelmällä ei voida valmistaa. Jauhepetimenetelmällä valmistessa onttoja kappaleita, ovat ontot rakenteet täynnä materiaali jauhetta. Valmistaja kertoo kotisivuillaan Metal X:llä luotujen kappaleiden kustantavan jopa 10 kertaa vähemmän, verrattuna kilpailijoiden saatavilla olevien mallien keskimääräisiin valmistuskustannuksiin. Huonona puolena laitteessa voidaan pitää sitä, että materiaalivalmistajia ei voida kilpailuttaa. Markforged on siis ainoa valmistaja, joka toimittaa materiaalia kyseisen mallin käyttöön. Mallin muunneltavuus on myös heikko.

4.3.2 Case 2

Toinen tilanne on, että laitteistolle varattu budjetti kattaa kaikkien vertailussa olevien laitteiden hankintahinnan. Annetaan tälle tilanteelle tunniste case 2. Tällöin valintani olisi SLM 280 2.0. Valinta perustuu siihen, että valmistajan laitteistoa on käytössä teollisuuden eri aloilla. Laitteeseen on saatavilla paljon lisävarusteita ja erilaisia laser vaihtoehtoja, jolloin sen muunneltavuus on parempi. SLM 280 2.0 on myös yllämainittuun laitteeseen verraten enemmän teollisuuskäyttöön suunniteltu malli.

Valmistaja SLM Solutions Group AG on yksi alalla pisinpään toimineista, joten heiltä löytyy vankkaa kokemusta laitteiden kehittämisestä ja tekniikasta. 280 2.0 on uudistettu malli vanhasta 280 mallista, joten laitteen perustekniikka on hyväksi havaittu. Valmistajalla on maahantuojia myös Suomessa, joka helpottaa osaltaan laitteiston huoltoa ja mahdollista korjausta.

4.3.3 Vertailu

Molemmissa hankinnoissa on hyvät ja huonot puolensa. Case 2:si valittu malli SLM 280 2.0 on täysverinen teollisuustason laite. Laitteella on suuri käyttöarvo myös teollisuustason tuotannossa. Hankintahinta laitteella on suuri, jolloin rahoituksen määrä tulisi olla korkea. Case 1:si valittu malli Metal X lukeutuu metallia materiaalinaan käyttävien AM-laitteiden uusiin innovaatioihin. Hankintahinta laitteelle on lisälaitteineen alhaisempi alle 125 000 \$. Rahoituksen määrä hankintaan ei siis tarvitse olla niin suuri. Metallia materiaalina käyttävien AM-laitteiden hinnat ovat vielä melko korkeat, ja ne tulevat todennäköisesti laskemaan valmistustekniikan yleistyessä. Tämä puoltaa hankintaa siis Metal X:n puolelle. Hankintahinnan ja jälleenmyyntiarvon erotus on Metal X:n kohdalla pienempi, eli arvonalasku euromäärässä on pienempi.

Lopputuloksena seitsemän eri mallin laitevertailusta valittiin kaksi laitetta, jotka soveltuvat eri budjettiluokan hankinnoiksi. Hankintaan valittiin kuvitteelliset kaksi rahoitustilannetta, joille annettiin tunnisteet case 1 ja case 2. Tämä siksi, että

rahoitukseen osallistuvien koulutusorganisaatioiden ja yritysten lukumäärä on vielä epävarma. Tästä syystä luonnollisesti myös hankinnan rahoituksen määrä, eli budjetti on vielä auki.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli mielenkiintoinen oppimisprosessi, jossa pääsin paneutumaan syvemmin itseäni kiinnostavaan aiheeseen, eli materiaalia lisäävään valmistukseen. AM, tai paremminkin 3D-tulostus oli opinnäytetyön alussa pintapuolisesti tuttu käsite, mutta syvemmin en ollut teknologiaan perehtynyt. Opinnäytetyön edetessä alkoi itsellenikin valjeta, että materiaalia lisäävä valmistus on tulossa yhdeksi valmistusmenetelmäksi perinteisten poistavan ja muovaavan valmistuksen rinnalle.

VAMK:ille, eli opinnäytetyön toimeksiantajalle työstä on varmasti hyötyä tulevaa hankkimisprosessia ajatellen. Lopputuloksena seitsemän eri mallin laitevertailusta valittiin kaksi laitetta, jotka soveltuvat eri budjettiluokan hankinnoiksi. Tämä siksi, että hankinnan rahoituksen määrä, eli budjetti on vielä epävarma. Työssä käsiteltyjä standardeja voidaan mahdollisesti myös hankkia ja hyödyntää niitä opetuksessa, kun tulevaisuudessa materiaalia lisäävää valmistusta painotetaan opetuksessa, ja erityisesti suunnittelun näkökulmasta voimakkaammin.

Opinnäytetyön haastavin osio oli ehdottomasti laitevertailuun valittujen mallien teknisten tietojen etsiminen. Olin yhteydessä kaikkiin valmistajiin, mutta yksikään heistä ei suostunut luovuttamaan tarkempia teknisiä tietoja malleistaan yksityisille henkilöille. Erityisesti suurimpien laitevalmistajien hintatietoja ei laitteista juurikaan löytynyt. Suurimpiin laitevalmistajiin voidaan lukea vertailussa olleet SLM Solutions Group AG, Concept Laser, sekä 3D Systems. Laitevertailussa tuotiin esille alan uusimpia innovaatioita, ja aika näyttää mihin ne vielä kehittyvät.

LÄHTEET

- /1/ ASTM 2017 Additive Manufacturing, Viitattu 1.12.2017.
<https://www.astm.org/industry/additive-manufacturing-overview.html>
- /2/ Muovi yhdistys materiaalia lisäävä valmistus, Viitattu 1.12.2017.
<http://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/23/osa-21-ainetta-lisaavat-valmistusmenetelmat-additive-manufacturing/>
- /3/ Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2015. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. New York. Springer Science+Business Media
- /4/ Alvo savonia menetelmät, Viitattu 5.2.2018.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/>
- /5/ Loughborough University Powder Bed Fusion, Viitattu 2.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- /6/ Alvo savonia jauhepetimenetelmät, Viitattu 2.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/47-jauhepetimenetelmat>
- /7/ Loughborough University Material Extrusion, Viitattu 3.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
- /8/ Alvo savonia materiaalin pursotus, Viitattu 3.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/52-materiaalin-pursotus>
- /9/ Alvo savonia materiaalin ruiskutus, Viitattu 4.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/57-materiaalin-ruiskutus>
- /10/ Loughborough University Material Jetting, Viitattu 4.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- /11/ Alvo savonia laminointimenetelmä, Viitattu 5.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/50-laminointimenetelma>
- /12/ Loughborough University Sheet Lamination, Viitattu 5.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- /13/ Alvo savonia sidosaineruiskutusmenetelmä, Viitattu 6.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/49-sidosaineruiskutusmenetelma>

- /14/ Loughborough University Binder Jetting, Viitattu 6.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- /15/ Alvo savonia suorakerrostusmenetelmä, Viitattu 7.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/48-suorakerrostusmenetelma>
- /16/ Loughborough University Direct Energy Deposition, Viitattu 7.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- /17/ Alvo savonia nesteen fotopolymeerisointi, Viitattu 15.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/51-nesteen-fotopolymeerisointi>
- /18/ Loughborough University VAT Photopolymerisation, Viitattu 16.12.2017.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>
- /19/ Alvo savonia hybridimenetelmät, Viitattu 17.12.2017.
<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/menetelmat/53-hybridi>
- /20/ Medium Design Rules, Viitattu 2.1.2018.
<https://medium.com/makernest/a-few-basic-design-rules-for-metal-3d-printed-parts-1eec4980bb24>
- /21/ VTT DIVA, Viitattu 3.1.2018.
<http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/varaosat-biteiksi>
- /22/ Teknologiainfo 3D-tulostus mullistaa teollisen tuotannon, Viitattu 4.1.2018.
<http://www.teknologiainfo.com/innovaatiot/3d-tulostus-mullistaa-teollisen-tuotannon>
- /23/ Firpa lista, Viitattu 5.1.2018. http://www.firpa.fi/AM_lista_viimeisin.pdf
- /24/ Savonia tilannekatsaus, Viitattu 21.1.2018.
<http://alvo.savonia.fi/images/materiaalia/2017-05-Tilannekatsaus-Saksa-metalli.pdf>
- /25/ 3D Print 3D printing dangers, Viitattu 16.1.2018.
<https://3dprint.com/81526/3d-print-dangers/>
- /26/ SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 -standardi
- /27/ Iso.org ISO/ASTM 52901, Viitattu 5.1.2018.
<https://www.iso.org/standard/67288.html?browse=tc>
- /28/ ASTM ISOASTM 52910, Viitattu 6.1.2018.
<https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52910.htm>

- /29/ Iso.org ISOASTM 52911-1, Viitattu 7.1.2018.
<https://www.iso.org/standard/72951.html>
- /30/ ASTM: ISOASTM 52907, Viitattu 7.1.2018.
<https://www.iso.org/standard/73565.html>
- /31/ Bodycote neutraalikarkaisu, Viitattu 19.1.2018. <http://www.bodycote.fi/fi-FI/services/heat-treatment/harden-and-temper/neutral-hardening.aspx>
- /32/ Bodycote päästö, Viitattu 19.1.2018. <http://www.bodycote.fi/fi-FI/services/heat-treatment/harden-and-temper/tempering.aspx>
- /33/ Xact Metal Info, Viitattu 8.1.2018. <http://www.xactmetal.com/>
- /34/ Xact Metal XM300, Viitattu 10.1.2018. <http://www.xactmetal.com/xm300/>
- /35/ SLM Solutions About us, Viitattu 9.1.2018. <https://slm-solutions.com/about-slm/about-us>
- /36/ AIMD3D Company, Viitattu 9.1.2018. <http://www.aim3d.de/en/company/>
- /37/ 3D-Systems Our story, Viitattu 10.1.2018. <https://www.3dsystems.com/our-story>
- /38/ 3D-Systems ProX DMP 300, Viitattu 11.1.2018.
<https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-dmp-300>
- /39/ Markforged About, Viitattu 11.1.2018. <https://markforged.com/about/>
- /40/ Markforged Metal X, Viitattu 11.1.2018. <https://markforged.com/metal-x/>
- /41/ Aurora Labs About, Viitattu 12.1.2018.
<https://auroralabs3d.com/#!about/about-us>
- /42/ Aurora Labs S-Titanium Pro, Viitattu 12.1.2018.
<https://auroralabs3d.com/files/Aurora-Labs-S-Titanium-Pro-Brochure-14-12-2017.pdf>
- /43/ Concept Laser Company, Viitattu 13.1.2018. <https://www.concept-laser.de/en/company.html>
- /44/ GE M1 Cusing, Viitattu 14.1.2018. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/m1-cusing>

Taulukko 2.

<https://auroralabs3d.com/files/Aurora-Labs-S-Titanium-Pro-Brochure-14-12-2017.pdf>

http://www.xactmetal.com/wp-content/uploads/2017/11/Xact-Metal_XM300-Product-Sheet_20171113.pdf

<https://markforged.com/metal-x/>

https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_M1_cusing_EN_update_2_Eigendruck_X3.pdf

https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-01/3D-Systems_DMP_SpecSheet_US_A4_2017.01.23_a_WEB.pdf

<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/aim3d-exam-255/>

https://slm-solutions.com/sites/default/files/downloads/121en171015-01-002-slm280-20_web.pdf

<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/concept-laser-m1-cusing/>

<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/m1-cusing>

<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/aurora-labs-s-titanium-pro/>